

Ella Ruokokoski

Stereoskooppinen video CAVE-ympäristössä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Mediatekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

14.4.2015

Tekijä Otsikko	Ella Ruokokoski Stereoskooppinen video CAVE-ympäristössä
Sivumäärä Aika	43 sivua 14.4.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Mediatekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Digitaalinen media
Ohjaaja	Lehtori Jonna Eriksson
<p>Insinööriyön tarkoituksena oli selvittää CAVE-ympäristön mahdollisuuksia stereoskooppisen videon julkaisualustana ja samalla pohtia sitä, mitä videon tuotannossa pitäisi ottaa huomioon, kun se viedään CAVE-ympäristöön.</p> <p>Työ lähti liikkeelle tuottamalla ensimmäinen testivideo, jonka avulla tutkittiin mitä työkaluja videon CAVE-ympäristössä julkaiseminen vaatii, sekä sitä, kuinka videon jälkituotanto täytyy suorittaa, jotta video vastaisi parhaiten tilan vaatimuksia. Ensimmäisen testauskerran jälkeen tuotettiin uusi video, jolla CAVE-testausta jatkettiin.</p> <p>Video onnistuttiin julkaisemaan CAVE-ympäristössä erillistä stereoskooppista videota toistavaa soitinta käyttäen. Insinööriyössä testattiin kahta soitinta, joilla video onnistuttiin saamaan näkymään niin, että sitä oli mahdollista tarkastella ympäristössä stereoskooppisesti.</p> <p>Stereoskooppisen videokuvan esittämiseen CAVE-ympäristössä liittyy vielä ongelmia, jotka täytyy ratkaista. Ongelmia tuottavat ainakin videosoittimien rajoitukset esimerkiksi resoluution suhteen sekä seinänäyttöpintojen yhtymäkohtien aiheuttamat vääristymät katseltavaan videokuvaan. Lisäksi tässä työssä ei tutkittu sitä, miten CAVE-ympäristöjen lattia- tai katto-näyttöpintojen hyödyntäminen videon esittämisessä olisi mahdollista.</p> <p>Insinööriyössä tutkittiin stereoskooppisen videon viemistä CAVE-ympäristöön ensimmäistä kertaa, eikä videon sisältö tai sen tuotanto ollut työssä pääosassa. Työn yhtenä tarkoituksena on toimia pohjana mahdollisille tuleville tuotannoille, joissa stereoskooppista videota tuotetaan julkaistavaksi CAVE-ympäristössä.</p>	
Avainsanat	stereoskooppinen videotuotanto, CAVE, 3D, stereoskopia

Author(s) Title	Ella Ruokokoski Stereoscopic video in CAVE
Number of Pages Date	43 pages 14 April 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Media Technology
Specialisation option	Digital Media
Instructor	Jonna Eriksson, Senior Lecturer
<p>The purpose of this final year project was to research the possibilities of CAVE as a platform for stereoscopic video and also analyse what things have to be taken into consideration in the production of the stereoscopic video when it is being published in CAVE.</p> <p>The work began by producing a test video with which it was examined what tools publishing of the video in CAVE requires and also how the post production has to be carried out so that the video would match the requirements of the environment in the best way possible. After the first CAVE testing, a new video was produced and it was used in the tests that followed.</p> <p>The publication of the video in CAVE was possible using a separate video player that was able to play stereoscopic video. Two video players, with which it was possible to view the video as stereoscopic 3D in CAVE, were tested.</p> <p>Presenting stereoscopic video is possible in CAVE but there are problems that still need to be solved. These problems include the resolution restrictions of the players and distortions in the video in places where two projection screens are connected. Moreover, the problem of how to utilize the floor or ceiling projection planes was not studied in this project.</p> <p>In this final year project the publication of stereoscopic video in CAVE was researched for the first time and neither the contents nor the production of the video was in the main role. One of the purposes of this is to work as a basis for possible future video productions that are to be published in CAVE.</p>	
Keywords	stereoscopic video production, CAVE, 3D, stereoscopy

Sisällys

Käsitteitä

1	Johdanto	1
2	Stereonäkö ja stereoskooppisen kuvan perusteet	2
2.1	Binokulaarinen näköaisti	2
2.2	Intraokulaarinen etäisyys	3
2.3	Konvergenssi ja divergenssi	3
2.4	Parallaksi	4
2.3	Mukautuminen	6
3	Stereoskooppinen videotuotanto	7
3.3	Kalusto	7
3.4	Interaksiaalinen etäisyys	8
3.5	1/30-sääntö	9
3.6	NPP, syvyyshaarukka ja syvyysbudjetti	10
3.7	Katseluetäisyys	11
3.8	Konvergenssin asettaminen ja keystone-efekti	12
3.9	Stereoikkunan rikkoutuminen	13
3.10	Eroavuudet kuvien välillä	14
3.11	Jälkituotanto	15
3.12	Stereoskooppisen kuvan katselu	16
4	CAVE-järjestelmä	20
4.1	CAVE yleisesti	20
4.2	Historiaa ja nykytila	21
4.3	Tekniikka	22
4.4	Metropolia Ammattikorkeakoulun talotekniikan CAVE-ympäristö	24
5	Stereoskooppisen videon tuottaminen ja vieminen CAVE-ympäristöön	26
5.1	Projektin ensivaiheet ja videon suunnittelu	26
5.2	Ensimmäiset kuvaukset	26
5.3	Videon jälkituotanto Adobe Premiere Pro -ohjelmassa	28
5.4	Ensimmäinen CAVE-testaus	29
5.5	Toiset kuvaukset ja videon koostaminen	32
5.6	Seuraavat CAVE-testaukset	34

5.7	Loppupäätelmät	37
6	Yhteenveto	40
	Lähteet	41

Käsitteitä

<i>Stereoskopia</i>	Nimitys tekniikoille, joilla kaksikulotteiseen kuvaan luodaan syvyysvaikutelmaa.
<i>Binokulaarinen näköaisti</i>	Näköjärjestelmä, jossa on kaksi silmää. Stereoskooppinen kuva perustuu binokulaariseen näköaistiin.
<i>Stereoikkuna</i>	Stereoskooppista kuvaa katseltaessa näyttöpinta, jossa kohteet voivat sijaita näytön tasossa, sen takana tai sen edessä.
<i>CAVE</i>	Cave Automatic Virtual Environment. Tila tai huone, jonka seinämät ovat näyttöpintoja. Näyttöpinnoille projisoidun kuvan avulla luodaan käyttäjälle kokemus virtuaalitodellisuudesta.
<i>Lomitettu videokuva</i>	Lomitettu videokuva koostuu kahdesta kentästä eli puolikuvasta, joista ensimmäiseen piirtyvät ensin kaikki parilliset juovat ja toiseen tämän jälkeen kaikki parittomat juovat. Puolikuvia muodostuu 50 kuvaa sekunnissa, ja lomitettuna ne muodostavat 25 kokokuvaa. Lomitetun videokuvan tunniste on i (interlaced).
<i>Progressiivinen videokuva</i>	Progressiivinen videokuva tarkoittaa lomitamatonta kuvaa, jossa kuvan kaikki juovat piirtyvät kerralla yhdelle kentälle. Kuvia muodostuu 25 sekunnissa. Progressiivisen videokuvan tunniste on p (progressive).
<i>Side-by-side-video</i>	Side-by-side-videossa stereoskooppisesti tuotettu videokuvapari asetetaan vierekkäin niin, että niitä on mahdollista tarkastella kolmiulotteisesti 3D-tekniikan avulla.

1 Johdanto

CAVE-ympäristöt ja varsinkin stereoskooppinen video ovat olleet olemassa jo pitkään ja varsinkin stereoskooppista videotuotantoa on käsitelty menneiden vuosien opinnäytetoissa jo varsin runsaasti. Stereoskooppisen videon vieminen CAVE-ympäristöön on kuitenkin jotain aivan uutta. Tämän insinööriyön tarkoituksena on tutkia ja testata CAVE-ympäristön mahdollisuuksia stereoskooppisen videon esittämisessä. Pohjana työlle on ajatus stereoskooppisen elävän kuvan tuomisesta yhä lähemmäs katsojaa niin, että tämä kokisi olevansa osana videolla esiintyviä tapahtumia. Ajatukseen liittyi oleellisesti CAVE-ympäristön ainutlaatuisen, yhteisöllisen virtuaalitodellisuuskokemuksen hyödyntäminen.

Insinööriyön tilaajana on Metropolia Ammattikorkeakoulu ja testausympäristönä Metropolia ammattikorkeakoulun talotekniikan koulutusohjelman Leppävaaran-toimipisteseen hankkima, Satavision Oy:n valmistama CAVE-ympäristö.

CAVE eli Cave Automatic Virtual Environment on huonomainen virtuaalitodellisuusympäristö, jossa on mahdollista kokea olevansa itse läsnä näyttöpinoille projisoidussa maisemassa. Yleisesti CAVE-ympäristöissä on esitetty tietokoneella luotuja 3D-malleja.

Insinööriraportin alussa käsitellään tarkemmin stereoskooppisen kuvan perusteita ja stereoskooppisen videon tuotantoa sekä CAVE-ympäristön historiaa ja tekniikkaa.

3D:n tulevaisuus edellyttää uusien tekniikoiden ja esittämisympäristöjen jatkuvaa tutkimusta ja kehitystä. Tämän insinööriyön tarkoituksena on osaltaan edistää 3D:n jatkuvuutta. Samalla tuodaan esille myös ajatus CAVE-ympäristön kehittämisestä alustana yhä laajempiin käyttötarkoituksiin.

2 Stereonäkö ja stereoskooppisen kuvan perusteet

2.1 Binokulaarinen näköaisti

Binokulaarinen näköaisti, toisin sanoen stereonäkö, tarkoittaa sitä, että näköjärjestelmässä on kaksi silmää. Näiden kahden silmän näkemät kuvat poikkeavat hieman toisistaan. Näkymien välistä eroa verkkokalvolla kutsutaan dispariteetiksi. Aivot yhdistävät molempien silmien näkymät yhdeksi synnyttäen syvyysvaikutelman, jota kutsutaan syvyysnäköksi. Stereoskopiolla tarkoitetaan kaikkia niitä tekniikoita, joiden avulla syvyysnäköä simuloidaan kaksikulotteisiin kuviin. Stereoskooppinen kuva muodostuu kahdesta kuvasta, jotka jäljittelevät vasemman ja oikean silmän tuottamaa näkymää todellisuudesta. Syvyysnäön perustana ovat sekä binokulaariset että monokulaariset syvyysvihjeet. Binokulaariset syvyysvihjeet voivat muodostua vain kahden silmän järjestelmässä. [1, s. 1–4; 2, s. 11–18; 3.]

Monokulaariset syvyysvihjeet

Monokulaarisia syvyysvihjeitä ovat esimerkiksi valot ja varjot, perspektiivi, kohteiden suhteelliset kokoerot ja päällekkäisyys. Suurin osa monokulaarisista syvyysvihjeistä perustuu opittuun tietoon, ja niiden avulla syvyyden hahmottaminen on mahdollista yhdelläkin silmällä. Joidenkin ihmisten binokulaarinen näköaisti on viallinen, tai he eivät pysty hahmottamaan maailmaa kolmiulotteisesti lainkaan. Syynä voivat olla toisen silmän sokeus, lihaksien kykenemättömyys konvergoimaan tai jokin muu näkövamma. Tällöin he hahmottavat syvyyttä ja etäisyyksiä juuri monokulaarisien syvyysvihjeiden avulla.

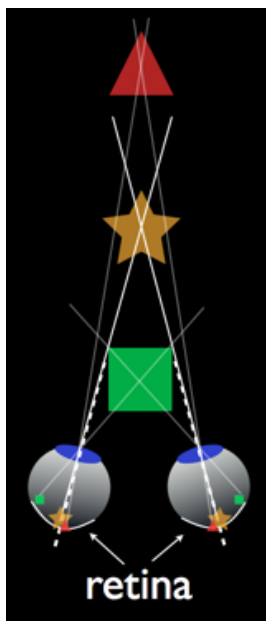
Liikeparallaksi on yksi monokulaarisista syvyysvihjeistä ja puhtaasti optinen. Liikeparallaksin avulla ihminen voi päätellä kohteiden etäisyyksiä sen perusteella, miten nopeasti ne liikkuvat. Lähempänä olevat kohteet näyttävät liikkuvan nopeammin kuin kauempana olevat kohteet. Monokulaarisia syvyysvihjeitä käytetään hyväksi syvyysvaikutelman luomiseksi esimerkiksi tietokonegrafiikassa. 3D-mallit perustuvat monokulaarisiin syvyysvihjeisiin. [1, s. 1–4; 2, s. 11–18; 3.]

2.2 Intraokulaarinen etäisyys

Intraokulaarisella etäisyydellä tarkoitetaan ihmisten silmien välistä etäisyyttä mitattuna silmien keskipisteistä. Intraokulaarinen etäisyys on keskimäärin 64 mm, ja siitä käytetään usein lyhennettä IO. Se, miten voimakkaasti syvyys hahmotetaan, riippuu intraokulaarisen etäisyyden suuruudesta. Näin eläimet, joiden silmät ovat paljon kauempana toisistaan kuin ihmisillä, hahmottavat syvyyttä paljon ihmistä voimakkaammin. [4.]

2.3 Konvergenssi ja divergenssi

Konvergenssi on yksi tärkeimmistä ihmisen binokulaarisista syvyysvihjeistä ja se auttaa kohteiden etäisyyksien hahmottamisessa. Ilman konvergenssia tarkastelemamme kohteet näkyisivät kahtena. Konvergenssissa silmämunia liikuttavat lihakset kääntävät silmiä sisäänpäin niin, että kohde näkyy molemmille silmille täsmälleen samassa kohdassa [kuva 1]. Jos kohde on erittäin lähellä katselijaa, tausta näkyy kahtena. Jos katse taas kohdistetaan lähelle olevan kohteen sijasta taustaan, näkyy lähempänä oleva kohde kahtena. Konvergenssi toimii parhaiten kohteisiin, jotka ovat enintään kymmenen metrin päässä katselijasta. Tätä kauempana olevien kohteiden etäisyyksiä hahmotetaan monokulaarisien syvyysvihjeiden avulla.



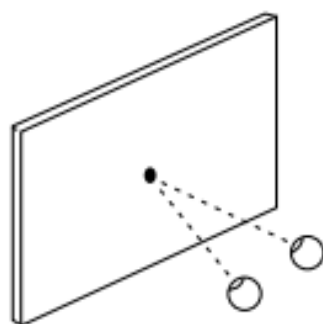
Kuva 1: Silmäpari konvergenssissa [4].

Divergenssillä tarkoitetaan silmien kääntymistä ulospäin eli konvergenssin vastakohtaa. Divergenssiä esiintyy vain stereoskooppista kuvaa katsellessa, kun kuvan parallaksi ylittää ihmisen IO:n. Divergenssissä silmien lihakset joutuvat tekemään työtä, johon ne eivät ole normaalioloissa tottuneet, ja altistuvat näin rasitukselle. Jos divergenssi on liian suuri tai silmät joutuvat olemaan divergenssissä liian kauan, tulee kuvan katselusta mahdollonta. [4; 1, s. 7–8; 2, s. 20; 5; 6.]

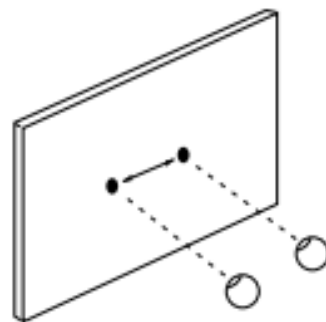
2.4 Parallaksi

Parallaksi tarkoittaa näennäistä muutosta kohteen sijainnissa, kun sitä tarkastellaan kahdesta eri kulmasta [7]. Parallaksi aiheuttaa silmissä dispariteettia synnyttäen binokulaarisen syvyysvihjeen. Stereoskooppisessa kuvassa parallaksi tarkoittaa saman kohteen välistä etäisyyttä, kun verrataan vasemman ja oikean puoleisia kuvia toisiinsa. Yleensä ero lasketaan pikseleinä.

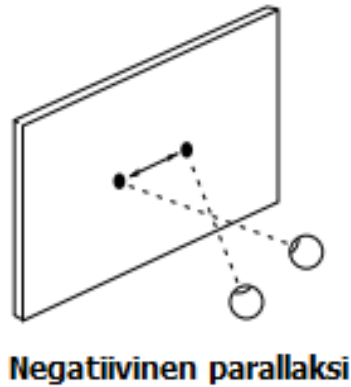
Parallaksin tasot voidaan jakaa kolmeen eri pääluokkaan: nollaparallaksiin, positiiviseen parallaksiin ja negatiiviseen parallaksiin [kuva 2]. Parallaksin tasoja havainnollistetaan stereoikkunan avulla. Stereoikkunalla tarkoitetaan ikkunaa tai näyttöpintaa, jossa objektit voivat sijaita näyttöpinnan tasossa, sen takana tai sen edessä. [1, s. 9–10; 2, s. 15; 4, 8; 9.]



Nollaparallaksi



Positiivinen parallaksi



Kuva 2. Parallaksin tasot [1, s. 9–10].

Nollaparallaksissa parallaksin arvo on nolla ja kohteet ovat molempien silmien näkymissä täysin samassa kohdassa. Kohteet, joilla on nollaparallaksi sijaitsevat kolmiulotteisessa näkymässä näyttöpinnan tasossa.

Positiivisessa parallaksissa parallaksilla on positiivinen arvo. Kun vasemman ja oikean puolen kuvat asetetaan päällekkäin, kohteet, joilla on positiivinen parallaksiarvo, ovat toisistaan erillään niin, että vasemman puolen kuvassa ne ovat enemmän vasemmalla ja oikean puolen kuvassa enemmän oikealla. Positiivista parallaksia esiintyy, kun silmät katsovat kaukana olevaa kohdetta ja ovat paralleelissa positiossa. Positiivisen parallaksiarvon kasvaessa liian suureksi, eli kun se ylittää intraokulaarisen etäisyyden, syntyy divergenssiä, joka, kuten aiemmin todettiin, aiheuttaa silmille räsitusta. Kohteet, joilla on positiivinen parallaksiarvo, sijaitsevat kolmiulotteisessa näkymässä näyttöpinnan takana.

Negatiivisessa parallaksissa parallaksin arvo on negatiivinen. Kohteet näyttävät menevät ristiin niin, että vasemman puolen kuva näkyy oikealla ja oikean puolen kuva vasemmalla. Kohteet, joilla on negatiivinen parallaksi, sijaitsevat kolmiulotteisessa näkymässä näyttöpinnan ja katsojan välissä, eli ne ikään kuin työntyvät ulos näyttöpinnasta. [1, s. 9–10; 2, s. 15; 4, 8; 9.]

2.3 Mukautuminen

Silmien mukautumisella tarkoitetaan tapahtumaa, jossa silmien linssit muuttavat kokoaan tarkentaakseen katseen johonkin kohteeseen. Yleensä kohde, johon silmät tarkentavat, on sama kuin se, johon ne konvergoituvat. Stereoskooppisen kuvan katselu näyttöpinnalta on kuitenkin poikkeus tähän sääntöön, koska silloin katse on fokusoituna näyttöpintaan eli nollaparallaksin tasolle, mutta konvergoituneena kohteisiin, joilla on joko negatiivinen tai positiivinen parallaksiarvo. Mukautumisen ja konvergenssin erkaantuminen ei ole silmille luonnollista, joten stereoskooppisen kuvan muodostus saattaa olla katselijalle ainakin aluksi vaikeaa tai kivuliasta. Erkaantuminen on sitä voimakkaampaa, mitä suurempi parallaksiarvo kuvassa on. Harjoittelun avulla stereoskooppisen kuvan katselusta tulee helpompaa ja mukavampaa, mutta perussääntö on, että kuvan parallaksiarvoja ei pidä päästää liian suuriksi. Stereoskooppista videota kuvattaessa tulisikin laskea kuvalle maksimiparallaksi. Tämä määrittää parallaksin rajan, johon voidaan vielä mennä niin, että ihmissilmät pystyvät vielä muodostamaan stereokuvasta kolmiulotteisen näkymän. [1, s. 11; 2, s. 20–21.]

Maksimiparallaksin laskemista ja parallaksin kontrollointia kuvaustilanteissa käsitellään myöhemmin kolmannessa luvussa.

3 Stereoskooppinen videotuotanto

Stereoskooppisen videon kuvaaminen vaatii paljon alkuvalmisteluja ja melko huolellista perusteisiin tutustumista, jotta virheiltä välttyttäisiin. Osan kuvauksessa sattuneista virheistä pystyy vielä korjaamaan jälkituotannossa. Joitain virheitä on kuitenkin vaikeaa tai mahdotonta korjata jälkituotannossa. Stereoskooppisen videotuotannon erikoisluontoisuuden vuoksi stereoskooppisen kuvan ja kuvaamisen perusteet ja tärkeimmät säännöt on hyvä hallita ennen kuvaamisen aloittamista.

3.3 Kalusto

Kamerat

Stereoskooppista videota voidaan kuvata esimerkiksi sitä varten valmistetulla kahden linssin stereoskooppisella kameralla, jossa interaksiaalinen etäisyys on vakio tai säädettävissä, kameraan asetettavien erikoislinssien avulla tai kahdella täysin identtisellä, rigille vierekkäin asetetulla kameralla. Kameroiden valintaan vaikuttavat muun muassa kuvauskohteet ja kuvattavan materiaalin julkaisualusta.

Rigit

Stereoskooppisessa kuvauksessa käytetään erilaisia rigejä kuvauskohteesta, -tilanteesta ja kameroista riippuen. Side-by-side-rigille kamerat asetetaan rinnakkain, ja niiden välinen etäisyys määrittyy kameroiden leveyden mukaan. Yleensä kameroita ei pystytä tällaiselle rigille asettamaan niin lähelle toisiaan, että kameroiden välinen etäisyys vastaisi täysin IO:ta.

Beamsplitter-rigiä käytetään, kun halutaan kuvata kohteita lähietäisyyksiltä ja sen avulla interaksiaalinen etäisyys voidaan laskea aina nolnaan asti. Beamsplitter perustuu tekniikkaan, jossa käytetään hyväksi valonsäteet kahdeksi jakavaa peiliä. Toinen kameroista kuvaa peililasin läpi ja toinen kuvaa peilin heijastuvaa näkymää.

Beamsplitterit tuottavat hyvää 3D-kuvaa, mutta niiden ongelmana ovat peilien herkkyyys ja alttius pölylle sekä niiden valoisuutta vähentävä vaikutus kuviin. Kameroiden asettelu rigille vaatii äärimmäistä tarkkuutta. [4; 2, s. 197–202.]

Objektiivit ja polttoväli

Jos kuvataan kameroilla, joissa objektiivien polttoväli ei ole kiinteä, on objektiivien valintaan ja polttoväleihin kiinnitettävä erityistä huomiota. Teleobjektiivien ongelmana on cardboarding-efekti, joka saa kuvan kohteet näyttämään litteiltä, ikään kuin pahvikuvilta. Näin kolmiulotteinen kuva ei näytä katsojalle kovin aidolta. Polttovälin muutokset vaikuttavat parallaksiarvoihin ja syvyysvaikutelmaan. Polttovälin asettaminen molemmissa kameroissa täysin samalle tasolle voi myös olla ongelmallista. Jotta kuva saadaan pysymään sallitun syvyyden rajoissa teleobjektiiveja käytettäessä, on tehtävä muutoksia interaksiaaliseen etäisyyteen. Jos polttoväliä säädetään kuvaustilanteessa, interaksiaalista etäisyyttä on muutettava samanaikaisesti. Zoomaus vaatii erityistä tarkkuutta, joten sitä käyttäessä tulisi käyttää kehittyneempiä rigejä.

Stereoskooppista kuvausta aloittaessa on turvallisempaa pidättäytyä laajakuvaobjektiveissa, joilla kuvattu stereoskooppinen kuva näyttää parhaalta. Objektiivien polttoväli kannattaa pitää alle 30 mm:ssä. [2, s.109–111, 197–201; 4.]

3.4 Interaksiaalinen etäisyys

Interaksiaalinen etäisyys tarkoittaa kameroiden linssien keskipisteiden välistä etäisyyttä toisistaan. Mitä suurempi interaksiaalinen etäisyys on, sitä vahvempi syvyysvaikutelma syntyy. Interaksiaalista etäisyyttä ja intraokulaarista etäisyyttä on nähty kutsuttavan virheellisesti toistensa synonyymeiksi, koska yleisen uskomuksen mukaan kameroiden välisen etäisyyden tulisi vastata mahdollisimman tarkasti ihmisen silmien välistä etäisyyttä. Tämä ei ole kuitenkaan välttämätöntä, jos tarkoituksena ei ole ihmisen stereonäön tarkka jäljitteleminen. Sopivan interaksiaalisen etäisyyden valintaan vaikuttavat pitkälti materiaalin käyttötarkoitus, julkaisu ympäristö, kameroiden polttovälit ja kuvauskohteiden etäisyydet. Interaksiaalinen etäisyys vaikuttaa syvyysvaikutelman voimakkuuteen, joten interaksiaalista etäisyyttä säätämällä voidaan luoda kuviin erilainen tunnelma. [4; 2, s. 78; 10.]

Stereoskooppista kuvaa, jonka tarkoitus on jäljitellä tarkasti binokulaarista näköaistia, eli kameroiden interaksiaalinen etäisyys vastaa IO:ta, kutsutaan orthostereoskooppiseksi. Kun interaksiaalinen etäisyys on asetettu suuremmaksi kuin IO, kuvan syvyysvaikutelma kasvaa ja tapahtuu jotain, mitä kutsutaan hyperstereoskopiaksi. Kohteet näyttävät kuvassa pienemmiltä kuin ne tavallisesti näyttäytyvät ja katsoja saattaa tuntea itsensä jättimäiseksi. Kun vastaavasti interaksiaalinen etäisyys on pienempi kuin IO, kohteet näyttävät suuremmilta kuin mihin todellisuudessa on totuttu. Tästä käytetään nimitystä hypostereoskopia. IO:ta pienemmillä interaksiaalisilla etäisyyksillä kuvataan, kun halutaan kuvata makrokuvaa. [4; 2, s. 78; 10.]

3.5 1/30-sääntö

Yksi tärkeimmistä säännöistä stereoskooppisen videon kuvaamisessa on 1/30-sääntö. Se kuvaa interaksiaalisen etäisyyden suhdetta lähimpään kuvattavaan kohteeseen. Interaksiaalisen etäisyyden tulisi tämän säännön mukaan olla aina yksi kolmaskymmenesosa kameroiden ja lähimmän kohteen välisestä etäisyydestä. Jos kohde sijaitsee liian lähellä kameroita, negatiivinen parallaksi ja siten konvergenssi kasvaa liian suureksi ja silmät eivät kykene kohdistamaan katsettaan kunnolla kohteeseen.

Interaksiaalinen etäisyys \times 30 = etäisyys lähimpään kohteeseen
Etäisyys lähimpään kohteeseen \div 30 = interaksiaalinen etäisyys

1/30 sääntö pätee hyvin, jos videota on tarkoitus katsella 3D-televisiosta tai miltä tahansa 65 tuumaa pienemmältä näytöltä. Jos tuotos on tarkoitettu julkaistavaksi isolla kankaalla, käytetään yleensä suhdelukua 1/60 tai isompaa. Siksi tulee muistaa, että vaikka 1/30 sääntö on tärkeä, suhdelukuja on muutettava käyttötarkoituksen mukaan. Tämän vuoksi julkaisualustan näyttöpinnan koko ja parhaassa tapauksessa katseluetäisyydet on hyvä tietää jo kuvausvaiheessa. [2, s. 117; 4.]

3.6 NPP, syvyyshaarukka ja syvyysbudjetti

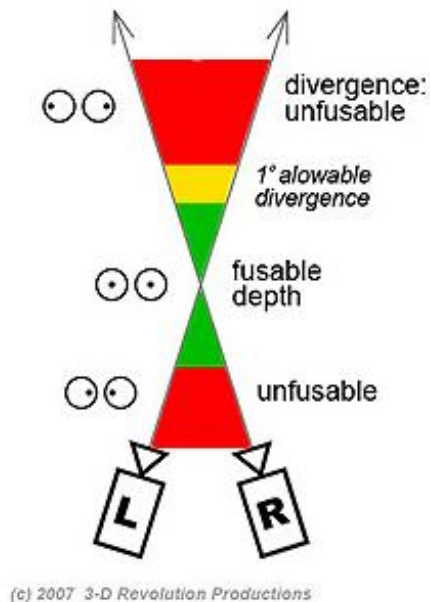
Liian lähellä kameraa olevat kohteet aiheuttavat silmien kääntymisen liikaa sisäänpäin ja näin vaikeuttavat katselukokemusta. Vastaavasti jos kuvassa esiintyy kohteita, joilla on positiivinen parallaksi, positiivinen parallaksi ei saisi ylittää katsellessa ihmisen intraokulaarista etäisyyttä, koska tällöin syntyy divergenssiä. Se, miten paljon kuvaan voi parallaksia sisällyttää, riippuu paljon näyttöpinnan koosta. Näyttöpinnan koolla on myös vaikutusta syvyysvaikutelman aistimiseen. 3D-vaikutelma kasvaa näytön koon kasvaessa. [2, s. 77.]

Natiivi pikeliparallaksi (Native Pixel Parallax, NPP) määrittää pikseleissä maksimaalisen parallaksin arvon, jota silmät pystyvät vielä näyttöpinnalla katselemaan. NPP lasketaan intraokulaarisen etäisyyden, näyttöpinnan leveyden ja sen vaakatason resoluution avulla. NPP on kätevä keino laskea kuvan maksimiparallaksiarvo, vaikka se ei huomioikaan katseluetäisyyden vaikutusta kuvan vastaanottamiseen. Usein negatiivisen parallaksin maksimiarvot voivat olla korkeampia kuin maksimaaliset positiivisen parallaksin arvot, riippuen kuvan asettelusta. [1, s. 22.] Parhaiten toimivat ratkaisut löytää usein koekailun kautta.

NPP = intraokulaarinen etäisyys (mm) ÷ näyttöpinnan leveys (mm) x vaakatason resoluutio (px)

NPP:n ja 1/30-säännön avulla voidaan laskea myös prosentuaaliset maksimiarvot positiiviselle ja negatiiviselle parallaksille suhteessa näyttöpinnan leveyteen. Ne muodostavat yhteenlaskettuna syvyysbudjetin kuvalle. Syvyysbudjetin rajat ylittävää kuvaa on epämiellyttävää tai mahdotonta katsella. Yleensä koko syvyysbudjettia ei kannata käyttää, koska lähimmän ja kaukaisimman kohteen välisen etäisyyden ollessa suurimmillaan, vaikkakin syvyysbudjetin rajoissa, näkymä ei pysy enää saman konvergenssin sisäissä, vaan silmät joutuvat tarkentamaan etualan ja taka-alan kohteisiin erikseen. Tätä voidaan toki käyttää tehokeinona, mutta se saattaa aiheuttaa ylimääräistä rasitusta ihmisille, jotka eivät ole tottuneet katselemaan kolmiulotteista kuvaa. Etummaisesta ja taaimmaisesta kohteen välistä etäisyyttä kutsutaan syvyyshaarukaksi. [2, s. 22–23, 87; 4.]

Hyvä muistisääntö kuvatessa on laskea etäisyys kamerasta kohteeseen joka on nolla-parallaksissa tai jonka aikoo asettaa jälkituotannossa nollaparallaksiin, ja jakaa tämä etäisyys kahdella. Tuloksena saatu etäisyys määrittää, kuinka pitkälle nollatason molemmiin puolin voidaan mennä, jotta pysytään katsomismukavuusalueen rajoissa. Kuva 3 havainnollistaa katselumukavuusalueen rajoja.



Kuva 3. Katsomismukavuusalue [10].

Toinen hyvä muistisääntö on, että jos kuvassa esiintyy kohteita etualalla, tausta ei saisi jatkua liian kauas äärettömään. Yksi Stereoskooppisen kuvan ongelmista onkin, että lähikuvia ei voi kuvata kaukaista maisemaa vasten, jos tahtoo pysyä yhden konvergenssin sisällä. Saman konvergenssin sisällä pysyminen on mahdollista telinsejä käyttämällä, mutta silloin cardboarding-efekti litistää näkymää eikä kuva näytä realistiselta. [2, s. 99.]

3.7 Katseluetäisyys

Se, miltä etäisyydeltä stereoskooppista kuvaa katsellaan, vaikuttaa siihen, miten se aistitaan. Mitä kauempana näyttöpinnasta kuvaa katsellaan, sitä tehokkaampi syvyysvaikutelma kuvassa on. Tämä johtuu siitä, että kuvan kohteiden suhteelliset etäisyydet toisistaan eivät muutu katseluetäisyyden muuttuessa. Käytännössä kohteet, joilla on negatiivinen parallaksiarvo, ovat kauempaa katsottuina suurempia.

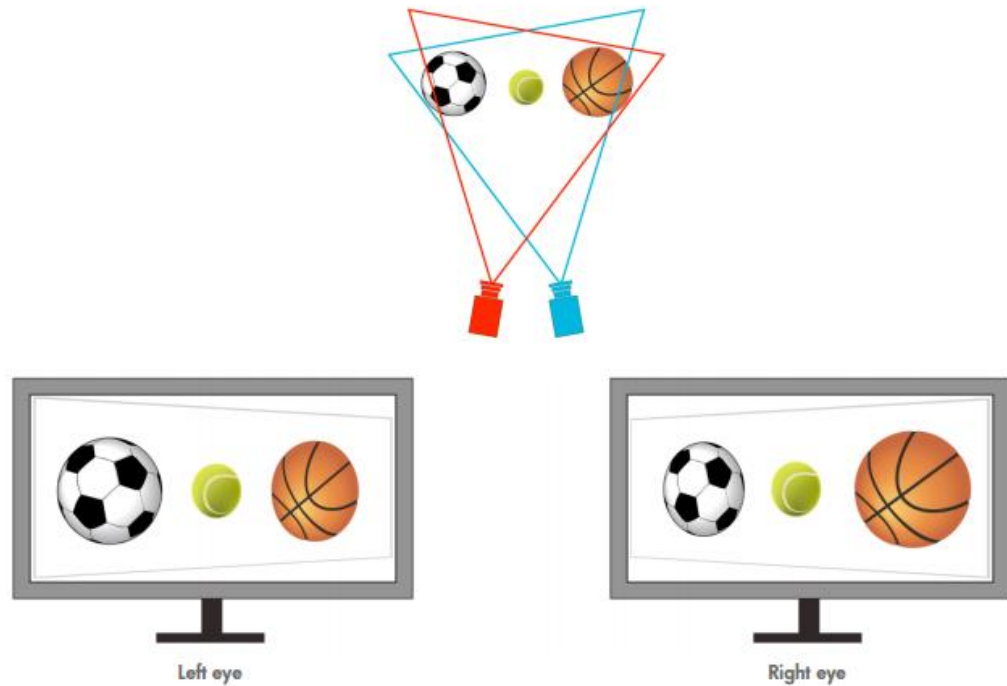
Katseluetaisyys vaikuttaa myös kuvan maksimiparallaksiarvoihin, koska suuremmilla katseluetaisyysilla kuvan parallaksiarvot synnyttävät pienempää retinaalista dispariteettia. Näin ollen parallaksiarvoja voidaan kasvattaa kuvissa katseluetaisyyden kasvassa. [1, s. 12, 22; 2, s. 77.]

Koska katseluetaisyys ja näytön koko vaikuttavat osaltaan kolmiulotteisuuden välittymiseen katsojalle, stereoskooppisen videon esitysympäristö olisi hyvä olla tiedossa jo ennen videon kuvaamista.

3.8 Konvergenssin asettaminen ja keystone-efekti

Kameroiden konvergenssilla tarkoitetaan stereoskooppisessa kuvauksessa kameroiden kääntämistä toisiaan kohti. Tällä yritetään matkia silmien konvergenssia. Nollaparallaksi sijaitsee siis kohteessa, kohon kamerat on konvergoitu. Kun kamerat on asetettu kuvaamaan kohtisuoraan eli paralleelisti, ne konvergoituvat äärettömään ja nollaparallaksi on äärettömässä. Tällöin kaikilla kuvattavilla kohteilla on negatiivinen parallaksi, eikä kuvissa ole kohteita, joilla olisi positiivinen parallaksi. Konvergenssilla kuviin saa toisin sanoen siis kohteita, jotka näyttävät olevan näyttöpinnan takana.

Kameroiden konvergenssista aiheutuu usein kuvien reunoille geometrinen vääristymä, jota kutsutaan keystone-efektiksi [kuva 4]. Vääristymät luovat kuviin vertikaalista parallaksia, jota stereoskooppisessa kuvassa ei saisi esiintyä, koska silmät ovat tottuneet vain horisontaaliseen poikkeamaan kuvien välillä. Jos kameroita on käännetty liikaa konvergenssiin, kuva saattaa olla jopa katselukelvoton. Koska konvergenssin voi asettaa myös jälkituotantovaiheessa niin, että keystone-efektiä ei synny, konvergenssin asettaminen jo kuvausvaiheessa on tarpeetonta. [2 s. 75; 4.]



Kuva 4. Keystone-efekti [12].

Jos kuviin lisätään konvergenssia, niihin on hyvä valita kohteita, joilla on eri parallaksiarvot syvyysvaikutelman vahvistamiseksi. Kannattaa kuitenkin tarkkailla syvyyshaarukkaa, jos tarkoituksena on pitää näkymä yhden konvergenssin sisässä. Jos konvergenssia lisätään vasta jälkituotannossa, nollaparallaksin taso on hyvä miettiä valmiiksi kuvaustilanteessa.

3.9 Stereoikkunan rikkoutuminen

Stereoikkunan rikkoutuminen on yksi yleisimmistä ongelmista stereoskooppisessa videokuvassa. Stereoikkunan rikkoutuminen syntyy, kun kuvan vasemmassa tai oikeassa reunassa olevasta kohteesta, jolla on negatiivinen parallaksi, näkyy enemmän kuvaparin toisessa kuvassa kuin toisessa. Rikkoutuminen tapahtuu tilanteissa, joissa kohde pysyy paikallaan pidempään kuin puoli sekuntia. Nopeasti liikkuvat kohteet eivät siis ehdi rikkoa stereoikkunaa. Tällöin kuva näyttäytyy näyttöpinnan edessä, mutta koska kuvan reunat leikkaavat kohteen, se näyttäytyy myös näyttöpinnan takana. Syntyy konflikti, jota aivot eivät kykene ratkaisemaan. [1, s. 17–18; 2, s. 79–81, 182; 8, s. 3.]

Kun stereoikkuna rikkoutuu kuvan ylä- ja alareunoista, kuva näyttää kaareutuvan katsojaa kohti.

Stereoikkunan rikkomista on kuvausvaiheessa vaikeaa välttää, joten sen korjaamiseksi on kehitetty keinot jälkituotannossa. Ongelman korjaaminen tapahtuu jälkituotannossa sijoittamalla maskeja kuvien reunoille, jotta ne osat kuvista, joita katsojan ei tahdota näkevän, peittyvät. Tätä toimenpidettä kutsutaan stereoikkunan kelluttamiseksi. [1, s. 17–18; 2, s. 79–81, 182; 8, s. 3.]

3.10 Eroavuudet kuvien välillä

Stereoskooppisen kuvaparin välillä ei saisi esiintyä minkäänlaista muuta eroavaisuutta kuin horisontaalista, koska ihmisen binokulaarinen näköaisti perustuu vain horisontaaliseen parallaksiin. Vertikaalinen parallaksi, kuvien kiertyminen, tarkennusvirheet, värierot ja poikkeamat kameroiden polttoväleissä rikkovat kaikki stereovaikutelmaa ja aiheuttavat silmille räsitusta, joka johtaa pahimmillaan kipuun ja pahoinvointiin. Tämän vuoksi kuvausten esivalmistelut ja kameroiden asettelu rigille ovat stereoskooppisen videon tuotannossa yksi tärkeimmistä vaiheista. Vaikka esimerkiksi pientä vertikaalista poikkeamaa ja värieroja kuvissa voi korjata jälkituotannossa, on varmempaa asettaa kamerat ja niiden valkotasapainot samalle tasolle jo kuvausvaiheessa. Tarkennusvirheitä on mahdotonta korjata jälkeinpäin, joten tarkennusasetuksiin kannattaa kiinnittää erityistä huomiota. [4; 12].

Haamukuva tarkoittaa stereoskooppisessa kuvassa virhettä, jossa toisen puolen kuva näkyy osittain silmään, johon sen ei ole tarkoitus näkyä. Tämä aiheuttaa kuvien näkymisen päällekkäin ja rikkoo näin stereovaikutelmaa. Haamukuvia esiintyy kohteissa, joilla on korkea parallaksiarvo, ja kuvissa, joissa on korkea kontrasti etualan ja taustan välillä. Haamukuvan muodostumiseen vaikuttaa myös käytetty näyttötekniikka. Välttämällä suuria kontrasteja kuvissa haamukuvien muodostumista voi torjua. [1, s. 12–13.]

Kameroiden asetuksista tehtävistä säädöistä muutamat auttavat olennaisesti vääristymien ehkäisyyn. Lähtökohtana on, että molemmissa kameroissa on identtisiiksi säädetyt asetukset. Perussääntönä asetusten säätämisessä on, että manuaaliasetuksia kannattaa suosia automaattiasetusten sijaan.

Kameroiden kuvanvakaus kannattaa ottaa pois päältä, koska se korjaa kuvia kuvaustilanteissa ja aiheuttaa näin stereoskooppiseen kuvaan vääristymää, jota on mahdotonta korjata jälkituotannossa. Automaattitarkennus on myös hyvä vaihtaa manuaaliseen, jotta tarkennuseroja kuvien välille ei syntyisi. Valkotasapainot tulee asettaa identtisiksi, mieluiten manuaalisesti, esimerkiksi valkoisen paperiarkin tai harmaakortin avulla. Jos mahdollista, stereoskooppista videota kuvatessa kannattaa kuvata lomitettun kuvan sijaan progressiivista kuvaa, koska lomitettu kuva saattaa aiheuttaa ajallista vääristymää. [4.] Lisäksi jos kuvia joutuu kutistamaan jälkituotannossa, kuvien resoluutio kärsii. Tällöin lomitetussa kuvassa saattaa esiintyä häiriöitä.

Aloittaessa stereoskooppista kuvausta sääntöjä kannattaa noudattaa melko tarkasti, mutta kokemuksen kasvaessa sääntöjä pystyy soveltamaan kuvauksessa entistä joustavammin. Parhaat asetukset eri kuvaustilanteisiin erilaisilla kalustoilla löytyvät testauksen kautta.

3.11 Jälkituotanto

Stereoskooppisissa kuvissa esiintyy usein jonkin verran vääristymää, kuten vertikaalista parallaksia. Stereoskooppisen videon jälkituotantoa varten on kehitetty erilaisia ohjelmia ja perinteisiin videoeditointiohjelmiin ladattavia lisäosia, joilla esimerkiksi parallaksit, keystone-efektit, stereoikkunan rikkoutuminen ja värivirheet on helpompaa korjata. Monet näistä korjauksista voi suorittaa näppärästi liukusäätimillä. Konvergenssin asettaminen ja säätäminen on ohjelmissa yleensä yksi oletustoiminnoista. Koska 3D-jälkituotanto on kehittynyttä, pienet virheet kuvauskentällä eivät vielä pilaa koko projektia.

Leikkaukset kannattaa stereoskooppisessa videossa pitää rauhallisina, varsinkin jos kuva vaihtuu vahvasta negatiivisesta parallaksista vahvaan positiiviseen parallaksiin. Jos katsojan silmät joutuvat mukautumaan eri parallakseihin liian nopeasti, huonovointisuuden riski kasvaa. Jos haluaa videoonsa nopeita leikkauksia, konvergenssipisteen tulisi pysyä kuvissa samalla tasolla. [4; 8; 10.]

Värimääritys on usein tarpeen stereokuvapareille, koska valkotasapainon määrittely täysin samaksi kameroiden välillä on haastavaa. Lisäksi beamsplitter-rigissä käytetty peilitekniikka värjää kuvia niin, että toinen kuva on hieman vihertävä ja toinen hieman punertava. Peilitekniikka tekee kuvista myös normaalia tummempia.

Värimäärittelyssä tulisi kiinnittää huomiota kuvien kirkkauteen, koska jotkin 3D-näyttö- ja esitystekniikat ovat valoteholtaan pienempiä kuin toiset. Myös stereolasien tummentava vaikutus tulisi ottaa huomioon. Usein stereoskooppinen kuvapari pitääkin muokata jälki-tuotannossa tavallista kirkkaammaksi.

Kuviin kannattaa lisätä jonkin verran värikylläisyyttä, koska stereoskooppista kuvaa kat-sellessa kauempana olevissa kohteissa värit näyttävät haaleammilta. Tämä johtuu siitä, että niistä katsojan silmiin heijastuvan valon intensiteetti on pienempi kuin lähellä olevista kohteista. Kontrastia ei saisi lisätä kuviin liikaa haamukuvien välttämiseksi. [2, s. 171; 13.]

Stereoikkunaa kelluttaessa reunoille lisättäviä maskeja voidaan animoida ja ne voivat olla erimuotoisia ja erisuuntaisia pystyakselin kanssa. Se, millaisia maskit ovat ja miten ne asemoidaan, vaikuttaa siihen, miten kuva näyttäytyy katsojalle. [2, s. 182.]

Koska 3D-jälkituotanto on kehittynyt, myös elokuvia, joita ei ole kuvattu alun perin ste-reoskooppisesti, voidaan muokata jälkeenpäin kolmiulotteisiksi. Tämän vuoksi kaikki 3D:nä markkinoidut elokuvat eivät ole todellisuudessa aitoa stereoskooppista kuvaa.

3.12 Stereoskooppisen kuvan katselu

Stereoskooppisen kuvan katselua varten on kehitetty esitys- ja näyttötekniikkaa, jossa vasemman ja oikean puolen kuvat on koodattu yhteen ja kuvaa pystyy katselemaan kol-miulotteisena erilaisilla laseilla, jotka suodattavat yhdistetystä kuvasta vasemman puolen näkymän vasempaan silmään ja oikean puolen näkymän oikeaan silmään. Laseissa käy-tettävä tekniikka riippuu käytetystä esitystekniikasta. Esitystekniikat voi jakaa passiivi-seen, aktiiviseen ja autostereoskooppiseen. [2, s. 56.] Myös esimerkiksi virtuaalitodelli-suuslasit perustuvat stereoskopiaan.

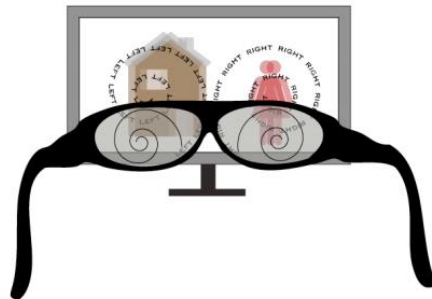
Passiivinen 3D

Passiivinen 3D-esitystekniikka perustuu polarisaatioon. Passiivinäyttötekniikkaa käyttä-vässä 3D-televisiossa kuvat lähetetään suotimien läpi näytölle yhtäaikaaisesti niin, että toinen kuva on pystypolarisoitunut ja toinen vaakapolarisoitunut. Passiivilasien linseissä on niin ikään suotimet, jotka suodattavat pois joko pystysuuntaiset tai vaakasuuntaiset

valoaallot ja muodostavat näin kolmiulotteisen näkymän verkkokalvolle. Passiivilasit eivät tarvitse virtaa toimiakseen.

Valkokankaalle kuvat projisoidaan joko kahdella tai yhdellä projektorilla. Kahta projektorilla käytettäessä vasemman ja oikean puolen kuvat näytetään omilla projektoreillaan ja projektoreihin on asetettu erilaiset suotimet. Yhtä projektorilla käytettäessä linssin eteen asetetaan suodin ja valkokankaalle heijastetaan vuorotellen vasemman ja oikean kuvan ruutu niin, että ruutujen polarisaatiot vastaavat passiivilasien linssien polarisaatiota. Valkokankaana toimii alumiinilla päällystetty niin kutsuttu hopeakangas, joka heijastaa valoa niin, että polarisaatio säilyy.

Passiivisessa polarisaatiossa käytetään joko lineaarista tai ympyräpolarisaatiota. Ympyräpolarisaatiossa valo polarisoidaan näyttöpinnasta kiertäen, myötäpäivään vasempaan silmään ja vastapäivään oikeaan silmään [kuva 5]. Ympyräpolarisaatio antaa katsojan liikutella päätään vapaammin, eikä stereovaikutelma rikkoudu yhtä helposti kuin pystypolarisoitua kuvaa katsoessa. [14; 15.]



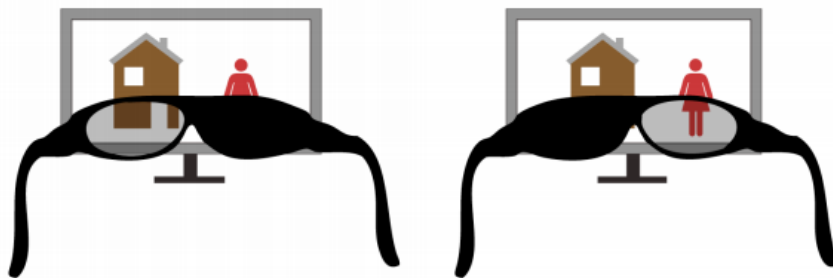
Kuva 5. Ympyräpolarisaation periaate [12].

Passiivisella näyttötekniikalla varustellussa 3D-televisiossa kuvat näytetään limittäin niin, että joka toinen pikselirivi on vasemman puolen kuvaa ja joka toinen oikean puolen kuvaa. [14; 15.]

Aktiivinen 3D

Aktiivisessa 3D-esitystekniikassa vasemman ja oikean puolen kuvaa näytetään vuorotellen erittäin nopeasti. Aktiivitekniikkaa käytävässä 3D-televisiossa näytön kanssa synkronoidut suljinlasit [kuva 6], joissa on LCS-linssit (Liquid Chrystal Shutter), estävät vuorotellen oikean ja vasemman silmän näkymän sen mukaan, mikä kuva näytöllä milloinkin on näkyvillä. Aktiivilasit tarvitsevat paristoja tai akkuja toimiakseen, ja aktiivinen 3D onkin tämän hetken 3D-tekniikoista kalleinta.

Kuvien tulisi vaihtua niin nopealla taajuudella, etteivät katsojan silmät ehtisi huomata väreilyä, joka saattaa aiheuttaa pääkipua. Aktiivilasitekniikassa haittapuolena korkean hinnan ja paristonvaihtotarpeen lisäksi on myös suljinlasien aiheuttama kirkkauden ja kontrastin väheneminen kuvissa. [15.]



Kuva 6. Suljinlasitekniikan periaate [12].

Kun aktiivista 3D-tekniikkaa käytetään esimerkiksi elokuvateattereissa, ei tarvita erikoisvalkokangasta, vaan kuvan voi heijastaa suoraan tavalliselle näyttöpinnalle. [2, s. 57.]

Anaglyfinen 3D

Anaglyfinen 3D perustuu värien suodattamiseen. Siinä kuvaparien värit muutetaan yleensä niin, että toinen on punainen ja toinen syaanin värinen. Kuvat yhdistetään ja tämän jälkeen kuvaa katsellaan puna-syaanilaseilla, jotka saavat kuvan näkymään katsojalle oikein. Anaglyfinen 3D ei vaadi erityistä näyttötekniikkaa toimiakseen, ja se onkin 3D-tekniikoista halvin. Se on kuitenkin myös tekniikoista ongelmallisinta siinä esiintyvien haamukuvien ja puutteellisen värispektrin vuoksi. [2, s. 56–57.]

Elokuvaeatterien esitystekniikoissa Dolby3D käyttää anaglyfiseen värien suodattamiseen perustuvaa tekniikkaa. Tämä tekniikka on perinteistä anaglyfstä 3D:tä paljon kehittyneempää. [16.]

Autostereoskooppinen 3D

Autostereoskopialla tarkoitetaan näyttötekniikkaa, joka mahdollistaa stereoskooppisen kuvan katselemisen kolmiulotteisena ilman stereolaseja. Autostereoskooppista näyttötekniikkaa toteutetaan muun muassa parallaksiesteiden ja lentikulaarisien linssien avulla. [17.]

4 CAVE-järjestelmä

4.1 CAVE yleisesti

CAVE on huonemainen tila, jonka seinät ja yleensä myös lattia ovat projektiopintoja. Joskus myös tilan katossa on projektiopinta. Näille pinnoille projisoidaan kuvaa tarkoituksena luoda tilassa oleville kokemus virtuaalisesta todellisuudesta. CAVE-nimi muodostuu sanoista Cave Automatic Virtual Environment, ja nimeen sisältyy myös viittaus Platonin luolavertaukseen. [18.]

CAVE:n erityispiirteenä on se, että käyttäjät voivat jakaa virtuaalitodellisuuskokemuksen toistensa kanssa ja kommunikoida keskenään. Virtuaalitodellisuuslaseihin verrattuna CAVE:n etuna on myös se, että käyttäjät voivat nähdä oman ruumiinsa, mikä vähentää pahoinvoinnin mahdollisuutta. [19.]

CAVE-ympäristössä [kuva 7] projektorit projisoivat kuvapinnoille stereoskooppista kuvaa, jota tilassa olijat tarkastelevat kolmiulotteisena näkymänä stereolasien avulla. Kuvan on tarkoitus olla oikeassa perspektiivissä katsojaan nähden ja sen kohteiden näkyä luonnollisessa koossaan, jotta todellisuuden illuusio olisi mahdollisimman vahva. [20]. Järjestelmän sisällä on yleensä sensoreita, jotka paikantavat katsojan liikkeitä niin, että kuvan perspektiivi muuttuu katsojan sijainnin mukaan. Yleensä CAVE-ympäristössä on myös tilaäänijärjestelmä, joka tukee osaltaan virtuaalitodellisuuskokemusta. [21]. CAVE-ympäristössä esitettävän kuvan on oltava korkealaatuista, koska sitä tarkastellaan lähietäisyydeltä.



Kuva 7. CAVE-ympäristö [22].

Yleisesti CAVE:n näyttöpinnoille on heijastettu tietokoneella luotuja kolmiulotteisia malleja. Näitä malleja on mahdollista ohjailla jonkinlaisella ohjaimella niin, että katsojat kokevat liikkuvansa itse 3D-mallin sisässä. Mallit voidaan myös heijastaa ympäristöön niin, että ne näyttävät leijailevan ilmassa ja käyttäjät voivat tarkastella niitä eri suunnista. [18.]

4.2 Historiaa ja nykytila

CAVE-järjestelmä kehitettiin Chicagossa Illinoisin yliopiston Electric Visualisation Laboratoryssa (EVL) Thomas A. DeFantin, Daniel J. Sandinin ja Carolina Cruz-Neiran johdolla, ja se esiteltiin ensimmäisen kerran vuonna 1992 [18].

Vuonna 2007 Christoph Sensenin johtama työryhmä Calgaryn yliopistosta Kanadasta julkaisi CAVEman-nimisen järjestelmän, jossa kolmiulotteinen korkearesoluutioinen malli ihmisruumiista on takaprojisoitu kuutioimaiseen CAVE-ympäristöön seinien ja lattian läpi niin, että se näyttää leijailevan huoneen keskellä. Käyttäjät voivat kävellä mallin ympärillä ja tarkastella sitä joka suunnasta. Mallia voi myös kääntää, ja käyttäjät voivat suurentaa haluamiaan yksityiskohtia. Malli vastaa anatomisesti oikeaa ihmisruumista.

Kolmiulotteisuutensa lisäksi malli toimii vielä aikaulottuvuudessa, koska tutkijat voivat simuloida mallilla sairauksien kehittymistä tai hoidon vaikutusta sairauksiin. [23.]

Alun perin CAVE kehitettiin helpottamaan tieteellistä visualisointia ja näin nopeuttamaan tutkimusprosesseja. Nykyään CAVE-ympäristöjä hyödynnetään tieteen ja tekniikan alan lisäksi myös taiteen ja viihteen tarkoituksiin. [18; 24.]

Suomessa kehittynein CAVE-järjestelmä sijaitsee Seinäjoen ammattikorkeakoulussa. Siinä on viisi näyttöpintaa ja projektio toteutetaan taustaprojektiona. [25.]

CAVE2

Vuonna 2012 EVL eli Electronic Visualisation Laboratory julkaisi kehittämänsä CAVE2-järjestelmän, jossa projektitekniikka on korvattu 3D LCD-näytöillä. [26.]

4.3 Tekniikka

CAVE-ympäristöjen näyttöpintojen määrä vaihtelee kahdesta kuuteen. Kuusiseinäinen CAVE on kuutio, jossa projektio toteutetaan taustaprojektiona. Taustaprojektiossa kuvat heijastetaan näyttöpinnoille niiden takana olevilla projektoreilla. Etuprojektiossa projektorit on sijoitettu näyttöpintojen etupuolelle. Etuprojektio vie vähemmän tilaa, mutta varsinakin usean seinän järjestelmässä sen käyttäminen on ongelmallista varjojen muodostumisen takia.

CAVE-ympäristöjen projektitekniikka on yleensä aina stereoskooppista, ja se voidaan toteuttaa joko aktiivisesti tai passiivisesti. Aktiivilasit synkronoidaan näyttöpintojen kanssa käyttäen joko radio- tai infrapunalähtettä, jotka sijoitetaan näyttöpintojen taakse. Nämä lähetimet lähettävät signaalin, jonka laseissa sijaitseva vastaanotin ottaa vastaan.

CAVE-ympäristöissä on yleensä 5.1 tai 7.1 -tilaäänijärjestelmä. Kaiuttimet täytyy asettaa niin, etteivät ne aiheuta häiriötä ympäristössä esitettäviin kuviin. [27, s. 10-9; 28; 29.]

Paikannus

CAVE-ympäristöissä voidaan käyttää erilaisia paikannustekniikoita. Paikannusta käytetään, jotta ympäristössä esitettävien kuvien ja mallien perspektiivi pysyy samalla tasolla käyttäjän perspektiivin kanssa myös hänen liikkuessaan. Erilaisia sensorisauvoja, ohjauslaitteita ja datahanskoja käytetään, kun halutaan esimerkiksi käänellä 3D-malleja.

Sähkömagneettisessa paikannuksessa paikannussensorit kiinnitetään paikannettavaan kohteeseen, yleensä stereolaseihin, jotta perspektiivi saadaan käyttäjän silmien tasolle. Ympäristöön asennetut lähettimet luovat tilaan matalataajuisen magneettikentän, jonka muutosten perusteella kohteen sensori paikantaa itsensä ja lähettää tiedot järjestelmään langattomasti tai kaapelia pitkin. [21; 26 s. 14; 30.]

Magneettisen paikannuksen ongelmana ovat kohina ja metallisten objektien aiheuttamat vääristymät magneettikentässä, jotka puolestaan aiheuttavat virheitä paikannuksessa. Paikannusvirheiden minimoimiseksi paikannusjärjestelmä on kalibroitava tarkasti. [31.]

Uudempaa paikannusteknologiaa edustavassa optisessa paikannuksessa tilaan asennetut kamerat lähettävät infrapunavaloa, joka heijastuu kohteeseen kiinnitetyistä optisista markkereista takaisin kameran kennolle. Optinen paikannusjärjestelmä prosessoi tiedot kameroista ja laskee markkereiden sijainnin kolmiulotteisessa tilassa. Optisen paikannusjärjestelmän etuna on, että sillä voi paikantaa monia kohteita samanaikaisesti ja se on vähemmän altis kohinalle kuin magneettinen paikannusjärjestelmä. [32.]

Kuvassa 8 optisia markkereita on kiinnitetty stereolaseihin.



Kuva 8. Stereolasit, joihin on kiinnitetty optisia markkereita [33].

Esimerkiksi Seinäjoen ammattikorkeakoulun CAVE-ympäristössä käytetään haptiikkaan perustuvaa laitetta, joka antaa käyttäjälle tuntopalautteen, kun tämä koskettaa tilassa kolmiulotteista mallia. Näin vahvistetaan virtuaalitodellisuuskokemusta. [34.]

4.4 Metropolia Ammattikorkeakoulun talotekniikan CAVE-ympäristö

Insinööriyön testaukset stereoskooppisen videon viemiseksi CAVE-ympäristöön tapahtuivat Metropolia Ammattikorkeakoulun talotekniikan CAVE-ympäristössä. Järjestelmän on valmistanut Satavision Oy.

Tässä CAVE-ympäristössä [kuva 9] on kolme seinänäyttöpintaa, joista jokainen on kooltaan noin 3 200 x 2 000 millimetriä. Tilassa on myös lattianäyttöpinta. Jokaisen näyttöpinnan resoluutio on 1 280 x 800 pikseliä, joten CAVE-ympäristön yhteisresoluutio on 5 120 x 800 pikseliä.



Kuva 9. Metropolia Ammattikorkeakoulun talotekniikan koulutusohjelman CAVE-ympäristö.

Ympäristössä on käytössä neljä aktiivista 3D-tekniikkaa käyttävää Optoman projektoria. Näkymää katsellaan Optoman paristokäyttöisillä suljinlaseilla, jotka synkronoituvat näyttöpintojen kanssa radiotaajuussignaalin avulla.

CAVE-ympäristön tietokonejärjestelmä on PC-pohjainen, ja sen näytönohjainkapasiteetti riittää HD-laatuiseen stereoskooppisen kuvan näyttämiseen kaikilla neljällä näyttöpinnalla. Käyttöjärjestelmänä on Windows 8.

Järjestelmässä on käytössä -eleohjausohjelmisto ja eleohjaukseen käytettävä interaktiivinen ohjauslaite. Eleohjausjärjestelmä tulkitsee ihmisen liikkeitä ja muuttaa katseluperspektiiviä niiden mukaan. Näyttöpinoille projisoitavaa 3D-mallia voi ohjailla joko hiiren tai langattoman ohjaimen avulla. Ympäristössä on käytössä 5.1 tasoinen tiläänijärjestelmä. [35.]

5 Stereoskooppisen videon tuottaminen ja vieminen CAVE-ympäristöön

5.1 Projektin ensivaiheet ja videon suunnittelu

Insinööritoimisto lähti liikkeelle tammikuussa 2016 taustatyöllä, jossa tarkoituksena oli perehtyä stereoskooppisen kuvan ja kuvaamisen perusteisiin sekä CAVE-ympäristön tekniikkaan. Lisäksi kuvattavalle videolle oli tarkoitus suunnitella sisältö.

Videota suunniteltaessa ei laadittu varsinaista käsikirjoitusta, koska tärkeämpää oli miettiä kuvauskohteita, jotka toimisivat hyvin 3D-ympäristössä. Lopulta videon sisältö muotoutui ideasta esitellä CAVE-ympäristössä jotain kaupunkia ja sen nähtävyyksiä. Videolle päätettiin kuvata Helsingin nähtävyyksiä ja julkista liikennettä, kuten raitiovaunuja. Suunnitteluvaiheessa CAVE-ympäristössä ei ollut vierailtu, eikä järjestelmästä ollut saatu paljoa tietoa. Tämä vaikeutti osaltaan kuvauskohteiden valintaa.

Materiaalia kuvattiin loppujen lopuksi kahteen otteeseen, mutta alkuperäinen idea säilyi pääpiirteiltään muuttumattomana.

5.2 Ensimmäiset kuvaukset

Ensimmäisen testausvideon kaikki materiaalit kuvattiin kahdella identtisellä Canon Legria HF S21 -videokameralla. Kameranat ovat pieniä käsikäyttöisiä videokameroita, jotka soveltuvat hyvin stereoskooppiseen kuvaukseen, koska niiden muodon ansiosta ne voidaan asettaa side-by-side-rigille melko lähelle toisiaan. Toinen syy, miksi Canon Legria -kameranat soveltuvat hyvin stereoskooppiseen videotuotantoon on se, että ne tallentavat Full HD -kuvaa.

Ennen kuvaamaan lähtöä kameran asetukset säädettiin identtisiksi. Molempien kameroiden valkotasapaino asetettiin manuaalisesti ennen kuvauksia mahdollisimman tarkasti valkoista paperiarkkia apuna käyttäen. Kameroiden automaattitarkennus vaihdettiin manuaaliseksi, koska automaattitarkennuksen riskinä ovat tarkennusvirheet, joissa toinen kamera tarkentaa johonkin kohteeseen ja toinen jonnekin muualle. Tarkennusvirheitä ei ole mahdollista korjata jälkituotannossa. Automaattinen kuvanvakausta kytkettiin myös pois päältä kuvausten ajaksi, jotta kuviin ei syntyisi vääristymäeroja.

Ensimmäisissä kuvauksissa kaikki materiaali kuvattiin 1920 x 1080 -resoluutiolla tallentaen lomitettua kuvaa, asetuksista asetettuna 50i.

Kamerat asetettiin rinnakkain side-by-side-rigille, joka oli oppilaitoksella valmiina tätä tarkoitusta varten rakennettuna. Ensimmäisissä kuvauksissa kamerat asetettiin mahdollisimman lähelle toisiaan ja kohdistettiin kuvaamaan kohtisuoraan eteenpäin. Rigissä oli valmiina mitta-asteikko, josta pystyi tarkistamaan kameroiden interaksiaalisen etäisyyden. Interaksiaalinen etäisyys oli ensimmäisissä kuvauksissa 90 mm.

Kameroiden asetteleminen rigille [kuva 10] täysin samalle tasolle osoittautui haasteelliseksi. Toinen rigin kamera-alustoista oli valmiiksi toista alempana, joten toisen kameran alle jouduttiin asettamaan pala paperia tai teippiä, jotta kamerat olisivat samalla tasolla myös pystysuunnassa. Tätä prosessia vaikeutti myös se, että kameroiden ollessa 90 mm päässä toisistaan, oikeanpuolimmaisesta kameran näyttöruutua ei saanut avattua. Näin kuvien parallakseja ei voinut tarkistaa näyttöruutujen avulla, vaan oli luotettava puhtaasti mittailuun. Rigille asettelu tehtiin sen ongelmallisuuden vuoksi jo ennen kuvauspaikalle lähtöä, ja hienosäädöt tehtiin kuvauspaikalla kameroiden ollessa jalustalla.



Kuva 10. Kaksi Canon Legria HF S21 -kameraa rigille asetettuna.

Kaikki materiaalit kuvattiin jalustan varassa, eikä kameroita liikuteltu kuvausten aikana. Kameroiden ollessa staattisessa positiossa kuvaustilanteessa, kuvan synkronointi jälkituotannossa on helpompaa. Jos stereoskooppista kuvaa halutaan panoroida, se tulee tehdä erittäin hitaasti. Liian nopeasti liikkuva stereoskooppinen kuva saattaa aiheuttaa katsojalle pahoinvointia, jonka aiheuttavat silmien ja tasapainoelimen aivoille lähettämät ristiriitaiset tiedot. Tasapainoelin toteaa ihmisen seisovan paikallaan, mutta silmät lähettävät aivoihin tiedon liikkeellä olost. Ilmiö on siis sama, joka syntyy kun ihminen voi pahoin liikkuvassa autossa. Englanniksi ilmiötä kutsutaan nimellä *motion sickness*. Suomeksi ilmiön nimi on matkapahoinvointi. Tämä nimi ei kuitenkaan kuvaa ilmiötä yhtään niin hyvin kuin englanninkielinen nimitys.

Jälkituotannossa tehtävän synkronoinnin helpottamiseksi jokaiseen kuvaan tallennettiin jonkinlainen äänimerkki.

5.3 Videon jälkituotanto Adobe Premiere Pro -ohjelmassa

Videon jälkityöt suoritettiin Adobe Premiere Pro CC 2015 -ohjelmalla Metropolia Ammattikorkeakoulun Leppävaaran-toimipisteen projektityötilassa.

Kuvatusta materiaalista koostettiin noin kolmen minuutin pituinen stereoskooppinen video side-by-side-menetelmällä. Lopputuloksessa vasemman ja oikean puolen videokuvat näkyvät vierekkäin samassa kuvassa. Menetelmässä vasemman ja oikean puolen kuvat tuodaan kahdelle päällekkäiselle videoraidalle aikajanalle siten, että vasemman kameran kuvat asetetaan ylemmälle raidalle ja oikean kameran kuva alemmalle. Tämän jälkeen kuvapari synkronoidaan tarkasti. [36; 37.]

Synkronointi on stereoskooppisen videotuotannon tärkeimpiä vaiheita, koska pienikin ajallinen eroavaisuus vasemman ja oikean puolen kuvan välillä rikkoo stereovaikutelmaa. Synkronointi suoritettiin kuvauksissa tehtyjen äänimerkkien avulla Premiere pro -ohjelman automaattisynkronointia käyttäen. Tämän jälkeen synkronoinnit tarkastettiin huolellisesti. Synkronoinnin jälkeen vasemman kameran videoraitaa siirrettiin yhden kuvaruudun verran eteenpäin. Näin kuviin saadaan lisää sujuvuutta etenkin liikkuviin kohteisiin.

Lopuksi videokuvat värimääriteltiin, jotta pienetkin värierot kuvien välillä saatiin poistettua. Videoon lisättiin samalla tavallista enemmän kirkkautta, koska CAVE-ympäristön projektitekniikka ja suljinlasit saavat kuvan näyttämään tavallista tummemmalta. Videon taustalle liitettiin internetistä ladattua tekijänoikeusvapaata musiikkia, ja video renderöitiin H.264-pakkaustandardilla, jotta lopputuloksesta saataisiin mahdollisimman korkea-laatuinen.

5.4 Ensimmäinen CAVE-testaus

Kun ensimmäinen testausvideo oli saatu editoitua, sitä lähdettiin testaamaan Metropolian talotekniikan koulutusohjelman oppilaitokseen hankkimaan Satavision Oy:n valmistamaan CAVE-ympäristöön. Tässä CAVE-ympäristössä neljä projektoria projisoi kuvaa neljälle näyttöpinnalle, joista yksi on lattiassa. Ympäristössä käytettävä 3D-tekniikka on aktiivista ja näyttöpinnoille heijastettavaa kuvaa tarkastellaan paristokäyttöisten suljinlasien avulla. CAVE-järjestelmän tietokoneen käyttöjärjestelmänä on Windows 8.

Ensimmäisellä testauskerralla olennaista oli löytää videon toistamiseen CAVE-ympäristössä tarvittavat työkalut ja tutkia, millä asetuksilla stereoskooppista kuvaa oli mahdollista siellä katsella.

Järjestelmän tutkimisen jälkeen selvisi, että stereoskooppisen videon toistaminen siellä niin, että sitä voisi katsella kolmiulotteisesti, vaatisi erillisen videosoitimen. Tilan koneella oli oma ohjelmansa 3D-mallien esittämistä varten, mutta tämä ohjelma ei soveltunut stereoskooppisen videon toistamiseen. Täytyi siis löytää ja ladata CAVE-ympäristön koneelle videosoitin, joka toistaisi side-by-side-tekniikalla tuotetun videon stereoskooppisesti, niin että sitä olisi mahdollista katsella tilan aktiivilaseilla kolmiulotteisesti.

Sopivan soittimen etsintä osoittautui oletettua haasteellisemmaksi. Suurin osa Internet-haulla löydetystä soittimista toisti annettujen tietojen perusteella stereoskooppista kuvaa vain anaglyfisesti, eivätkä ne siksi soveltuneet tämän työn tarkoituksiin. Toistamiseen testattiin myös VLC-videosoitinta, mutta siinäkin ainoa 3D-vaihtoehto oli anaglyfinen 3D. Anaglyfinen toistometodi on soittimissa yleinen, koska se ei vaadi erityistä näyttö- tai projektitekniikkaa toimiakseen.

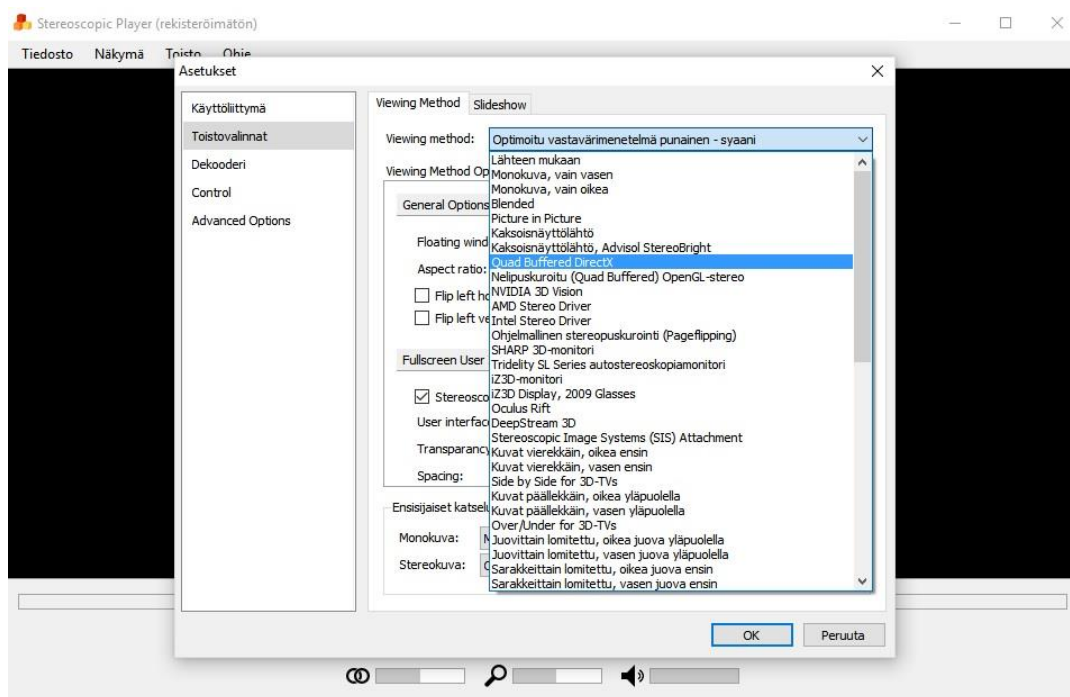
Stereoscopic Player

Peter Wimmerin kehittämä Stereoscopic Player osoittautui kokeiluista soittimista ensimmäiseksi toimivaksi vaihtoehdoksi. Soittimen uusin versio on tammikuussa 2016 julkaistu 2.4.3. Soittimessa on tuki kaikille yleisimmille videotiedostomuodoille ja side-by-side-formaatin lisäksi esimerkiksi lomitettuun muotoon tuotetulle stereoskooppiselle kuvalle. Lisäksi vasemman ja oikean puolen videoraitojen sekä kuviin mahdollisesti liittyvän ääniraidan tuominen soittimeen erillisinä tiedostoina on mahdollista. Soitin tukee lisäksi lukuisia eri katselumetodeja, joista valitaan sopiva esitystekniikan ja ympäristön mukaan. Soitin konvertoi videotiedoston reaaliaikaisesti valittuun katselumetodiin. Stereoscopic Playerissa on myös mahdollista suoratoistaa kuvaa suoraan kamerasta ja kelluttaa stereoikkunaa. Kätevänä ominaisuutena soittimessa on myös oma integroitu videokirjasto, jossa toistetut videot voi säilyttää ja soitin muistaa niille asetetut tuloasetukset.

Ensimmäisessä testauksessa käytettiin Stereoscopic Playerin ilmaisversiota, koska muut versiot vaativat maksullisen lisenssin. Yksityiskäyttöön tarkoitetun version lisenssin hinta on 39 euroa ja kaupalliseen käyttöön tarkoitetun 89 euroa. Kaupallisenkin version yleisömäärä on enintään 5 henkilöä, joten suuremmille katsojamäärille pitää hankkia elokuvateatterilisenssi, jonka hinta määräytyy katsojamäärän mukaan. Ilmaisversiossa videon toisto aika on rajoitettu viiteen minuuttiin. Stereoscopic Playerissa on mahdollista toistaa 3D-DVD-levyjä, mutta tätä varten on hankittava erillinen dekooderi [38].

Kun video avataan soittimeen, aukeaa tuloasetusikkuna, josta videon formaatin voi valita. Tässä tapauksessa formaatiksi valittiin tuotetun videon mukaan side-by-side, jossa vasen kuva on ensimmäisenä.

Tarkempaa tietoa esimerkiksi CAVE-järjestelmän koneen näytönohjaimesta ei ollut. Ei siis ollut tietoa siitä, mikä katselumetodi soittimesta täytyy valita, jotta stereoskooppista videota on mahdollista katsella CAVE-ympäristössä kolmiulotteisesti. Katselumetodilistan vaihtoehdot oli kokeiltava läpi yksi kerrallaan [kuva 11]. Testauksen kautta kävi ilmi, että katselumetodiksi täytyi Stereoscopic Playerin asetuksista valita Quad Buffered DirectX. Tämä metodi hyödyntää Windows 8 -käyttöjärjestelmän DirectX 11-rajapinnan tarjoamaa stereoskooppisen 3D:n tukea. Oikean katselumetodin löydyttyä videota pystyttiin tarkastelemaan kolmiulotteisena näkymänä.



Kuva 11. Stereoscopic Playerin katselumetodin valintaikkuna.

Testauksessa kävivät aikaisempaa selkeämmin ilmi siihen mennessä kuvatus materiaalin ongelmat. Kuvatussa materiaalissa esiintyi pystysuuntaista parallaksia, joka teki videon katselusta epämiellyttävää. Tämä johtui siitä, että kameroita ei ollut saatu asetettua keskenään täysin samalle tasolle pystysuunnassa. Tätä eroa on mahdollista korjata myös jälkityövaiheessa, mutta jos ero on suuri, on parempi ratkaisu kuvata videot uudelleen. Stereoscopic Playerissa on mahdollista säätää parallakseja, mutta säätötyökalu on melko kömpelö.

Videon resoluutio ei vastannut vielä CAVE-ympäristön vaatimuksia, joten kuvaa ei saatu levitettyä näyttöpinnoille maksimileveyteensä. Lisäksi selvisi, että tähän CAVE-ympäristöön videota tuotettaessa vasemman ja oikean puolen kuvia ei side-by-side-tekniikalla yhdistäessä tarvitse kutistaa leveyssuunnassa puoleen, vaan kuvat voi jättää täysleveysiksi, eli tässä tapauksessa 1 920 pikselin levyisiksi. Näin ollen sekvenssin koko tulee kasvattaa Premieressä kaksinkertaiseksi, 3 840 pikselin levyiseksi.

Testaus selkeytti ajatusta siitä, minkä tyyppiinen materiaali CAVE-ympäristössä esitetynä toimii parhaiten. CAVE-ympäristön koon paremman hahmottamisen myötä oli myös helpompaa arvioida sitä, millä etäisyyksillä kuvattavat kohteet kannattaa pitää. Lisäksi

CAVE:n näyttöpintojen koon avulla oli mahdollista laskea natiivi pikseliparallaksi eli maksimiparallaksin määrä kuvissa. Testauksiin käytetyn CAVE-ympäristön seinäpintojen yhteenlaskettu leveys oli 9 600 mm ja vaakatason resoluutio 3840 pikseliä. Näillä arvoilla laskettuna CAVE-ympäristössä esitetyn stereoskooppisen videon parallaksit eivät saisi näyttöpinnolla ylittää 25,6 pikseliä. Tässä oletuksena on, että kuva levittäytyy koko näyttöpintojen leveydelle. Katseluetäisyyden vaikutusta etäisyyksiin oli kuitenkin edelleen vaikeaa arvioida, koska kuvaa ei ollut vielä saatu levitettyä näyttöpinoille oikeassa resoluutiossa.

Testauksesta saatujen tietojen pohjalta päätettiin kuvata uutta materiaalia, josta koostettaisiin uusi video seuraavia CAVE-testauskertoja varten.

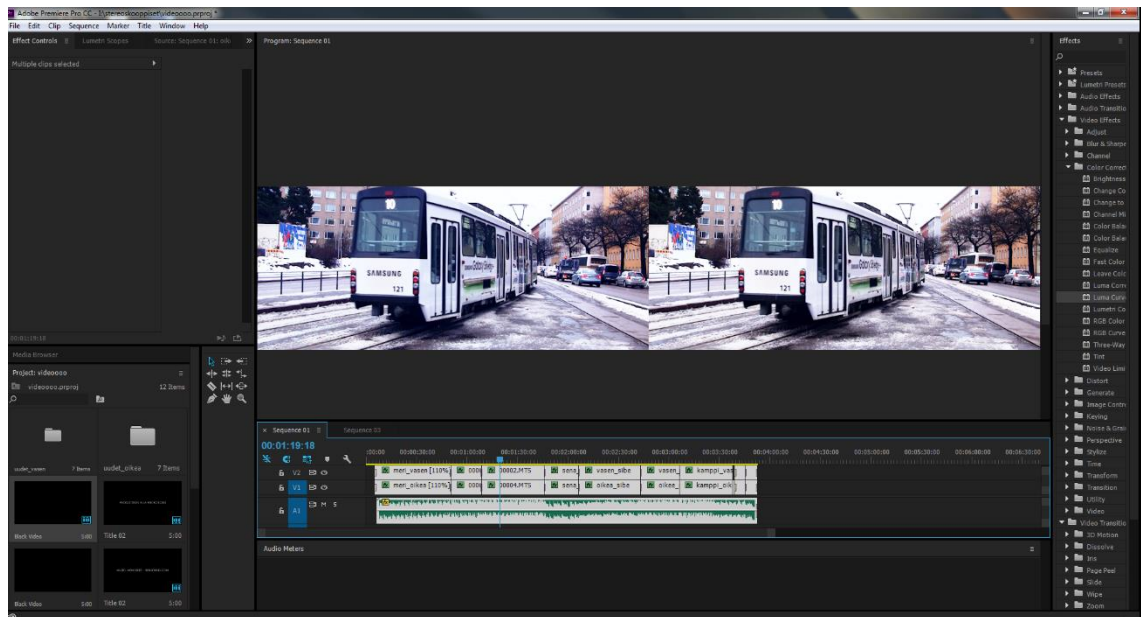
5.5 Toiset kuvaukset ja videon koostaminen

Toisissa kuvauksissa kamerat päätettiin asettaa niin erilleen toisistaan, että molempien näytöt saatiin avattua. Näin kuvista oli helpompaa mitätöidä vertikaalista parallaksia vertaamalla kameroiden näytöillä näkyviä kuvia toisiinsa. Kameroiden interaksiaalisiksi etäisyydeksi määrittyi lopulta 150 mm.

Toisen testivideon materiaali kuvattiin Canon Legria HF S100 -videokameroilla, jotka eivät tähän tarkoitukseen käytettyinä juurikaan eronneet aikaisemmin käytetyistä Canon Legria HF S21 -kameroista. Kamerat asetettiin kuvaamaan progressiivista videota, jotta välttyttäisiin lomitetusta kuvasta mahdollisesti syntyviltä ongelmilta kuvien synkronoinnin ja laadun suhteen. Lisäksi CAVE-ympäristön koon ja katseluetäisyyden vuoksi korkean resoluution merkitys kasvaa entisestään.

Kameroiden valkotasapainot asetettiin jälleen manuaalisesti, kuvanvakausta poistettiin ja tarkennus vaihdettiin automaattisesta manuaaliseksi.

Kuvat yhdistettiin jälleen side-by-side-muotoon, mutta tällä kertaa kuvia ei skaalattu leveyssuunnassa puoleen, vaan kuvat jätettiin täysleveyisiksi [kuva 12]. Sen sijaan projektin sekvenssin koko kasvatettiin kaksinkertaiseksi ja video tuotiin ulos lopulta erityisasetuksilla 4K-muotoon 3 840 x 800 pikselin resoluutiolla ja pakattiin H.264-standardilla.



Kuva 12. Side-by-side-videon jälkituotantoa. Vasemman ja oikean puolen kuvat on jätetty täysi-levyisiksi.

Valittu resoluutio vastasi testausympäristönä toimineen CAVE-ympäristön kokonaisresoluutiota, kun lattianäyttöpinta oli poistettu käytöstä. Testauksiin käytetyn CAVE-ympäristön näyttöpinnolle video levittäytyisi 1 920 pikselin leveydelle, kun sitä katsellaan stereoskooppisesti. Vasemman ja oikean puolen videoraidat on kuitenkin Stereoscopic Playerissa mahdollista toistaa myös erillisinä tiedostoina, jolloin kuva on mahdollista levittää koko näyttöpintojen leveydelle.

Kuvamateriaalia tarkasteltiin editoinnin lomassa jatkuvasti oppilaitoksen 3D-televisiolla. Oppilaitoksella oli kaksi 3D-televisiota, joita molempia käytettiin kuvamateriaalin testaukseen. Aktiiviteknikalla toimivaa Samsungin 3D-televisiota käytettiin suurimpaan osaan tuotantovaiheen testauksia [kuva 13]. Materiaalin testaus jälkitöiden yhteydessä on välttämätöntä, koska kuvaparien väliset poikkeavuudet ja muut mahdolliset ongelmat voi havaita kunnolla vain, kun tarkastelee kuvaparista muodostuvaa kolmiulotteista näkymää.



Kuva 13. Stereoskooppisen videon testaus 3D-televisiolla.

Ennen videon renderöintiä sille tehtiin jälleen värimääritys, jossa värierot mitätöitiin ja kirkkautta lisättiin. Sopivan kirkkaustason arviointi oli vaikeaa, koska videota ei ollut mahdollista testata säätämisen lomassa CAVE:ssa. Videon taustalle lisättiin jälleen tekijänoikeusvapaata musiikkia. Videolle ei päätetty lisätä konvergenssia jälkeinpäin, koska sitä ei nähty tämän insinööriyön kannalta tarpeelliseksi.

5.6 Seuraavat CAVE-testaukset

DepthQ Player

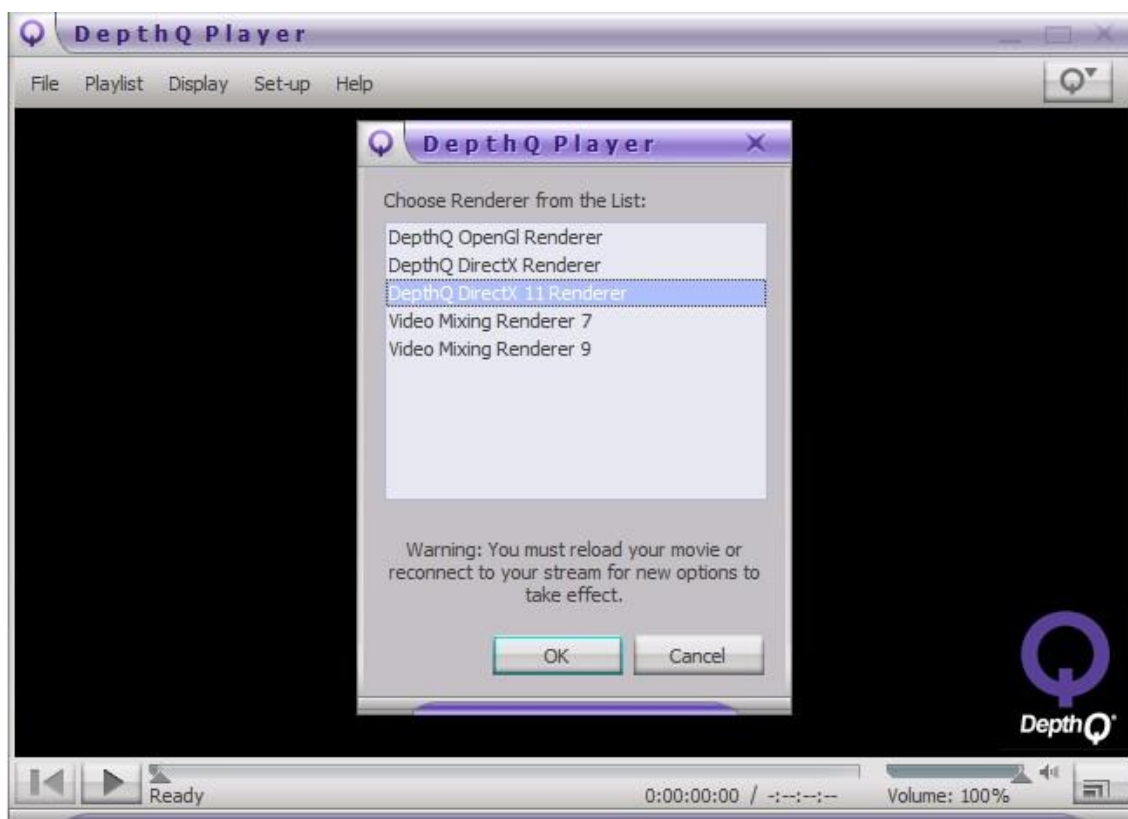
Toisella CAVE-testauskerralla stereoskooppisen videon toistamista testattiin Lightspeed Design Inc. -yhtiön kehittämällä DepthQ Playerilla. DepthQ Playerin ilmainen Lite-versio ladattiin CAVE-ympäristön tietokoneelle. Soittimen Standard- ja Pro-versioita käyttäköseen on hankittava maksullinen lisenssi.

DepthQ Playerin viimeisin versio on 2.0.34 vuodelta 2011. Soittimessa on tuki kaikille yleisimmille videotiedostomuodoille, ja oikean ja vasemman puolen videot voivat olla 1

920 x 1 080 pikselin resoluutiota. DepthQ Player tukee muun muassa side-by-side-, above/below- ja interlaced-formaatteja. Stereoscopic Playerin tavoin myös DepthQ Playeriin on mahdollista tuoda oikean ja vasemman puolen videot erillisinä tiedostoina. Ääniraidaksi voidaan valita tällöin joko vasemman tai oikean puolen videon ääniraita. Side-by-side-videot on mahdollista tuoda soittimeen täysikokoisena eli niin, ettei kuvia ole tarvinnut kutistaa leveyssuunnassa puoleen. Erittäin hyvänä ominaisuutena soittimessa on horisontaalisen ja vertikaalisen parallaksin helppokäyttöinen säätötyökalu, jossa parallaksien säätäminen onnistuu liukusäätimillä. Tämän ominaisuuden avulla parallaksien hienosäätö ja vääristymien korjaaminen videon lopullisessa julkaisu-ympäristössä on mahdollista. Hieman kömpelöä soittimen käytöstä tekee se, että videotiedosto on aina asetuksiin tehtyjen muutosten jälkeen ladattava soittimeen uudelleen.

Myös DepthQ Player tukee monia eri katselumetodeita. Soittimen asetuksista voi valita renderöintiin joko Microsoftin DirectX-rajapinnan tai alustariippumattoman Open GL-rajapinnan riippuen järjestelmän näytönohjaimesta. Lite-versiossa on myös rajoitettu käyttöaika, jonka jälkeen soitin on käynnistettävä uudelleen. DepthQ Playerin standardiversio maksaa noin 170 euroa ja pro-version hinta vaihtelee katsojamäärien mukaan noin 900 eurosta 1 800 euroon. [39.]

DepthQ Playerin renderöintiasetuksista valittiin DepthQ DirectX 11 Renderer -vaihtoehto [kuva 14] ensimmäisestä testauskerrasta saatujen tietojen perusteella. Videotulon asetuksista valittiin vaihtoehto side-by-side full, koska videon vasemman ja oikean puolen kuvat olivat täysleveyisiä. Näillä asetuksilla videota pystyi tarkastelemaan CAVE-ympäristössä stereolaseilla kolmiulotteisesti.



Kuva 14. DepthQ Playerin renderöintiasetusnäkyvä.

Toisissa kuvauksissa kuvattu materiaali toimi tilassa paremmin, ja siitä syntyi parempi vaikutelma videon maisemassa paikan päällä olemisesta. Kuvaa ei kuitenkaan saatu vielä levittäytymään maksimileveyteensä, joten esimerkiksi katseluetäisyyden vaikutuksia ei pystytty arvioimaan tarkemmin.

Viimeinen testauskerta

Kolmannessa ja tämän insinööritöön viimeisessä CAVE-testauksessa soittimista ensimmäiseksi testattuun Stereoscopic Playeriin oli hankittu lisenssi ja 4K-tarkkuudella re-renderöity video saatiin full screen -tilassa asettumaan CAVE-ympäristön kolmen seinä-näyttöpinnan keskelle. Side-by-side-muotoon tuotettu video ei levittäydy koko näyttöpinnan leveydelle, koska kuvien leveys on vain 1 920 pikseliä. Jos videon tässä ympäristössä halutaan levittäytyvän kaikkien kolmen näyttöpinnan leveydelle, videoraidat täytyy tuoda Stereoscopic Playeriin erillisinä tiedostoina.

Kun video oli viimein saatu näkymään ympäristössä täydessä koossaan, katseluetäisyyden ja materiaalin ongelmia voitiin arvioida tarkemmin. Joissain videon kuvissa kohteet

olivat liian lähellä, jos niitä tarkasteli CAVE-tilan keskellä seisoen. Tällöin etualan ja takalan kohteiden tarkastelu yhtäaikaaisesti oli mahdotonta tai vaikeaa. Parhaiten lyhyellä katseluetäisyydellä toimivat kuvat, joissa kohteet sijaitsivat kauempana kamerasta. Hie-
man kauempana näyttöpinnosta seisoessa myös lähempänä olevat kohteet näyttivät paremmilta.

Videolla näkyvät kohteet vääristyivät näyttöpintojen yhtymäkohdissa, katselukulmasta riippuen. Tähänkin ongelmaan tulisi kiinnittää huomiota mahdollisesti jo tuotantovaiheessa. CAVE-ympäristöissä, joissa näyttöpinta on kaareva, tätä ongelmaa ei esiinny.

Videon ongelmista ja tilan asettamista haasteista huolimatta testauksissa saatiin melko hyvä käsitys siitä, miltä stereoskooppinen video näyttää CAVE-ympäristössä tarkasteltuna, ja näin ollen idean jatkokehittäminen on helpompaa.

5.7 Loppupäätelmät

Insinööriyössä tehdyt testaukset osoittavat, että stereoskooppisen videon esittäminen CAVE-ympäristössä on mahdollista erillisellä, stereoskooppista videota toistavalla videosoittimella. Tämän insinööriyön käyttötarkoituksiin testattiin kahta videosoitinta, jotka soveltuivat stereoskooppisen videon esittämiseen testauksiin käytetyssä CAVE-ympäristössä.

Videon esittämiseen CAVE-ympäristössä liittyy vielä kuitenkin paljon haasteita. Seuraavaksi tulisi selvittää tarkemmin sitä, miten video tulisi tuottaa, jotta se loisi käyttäjälle mahdollisimman laadukkaan virtuaalitodellisuuskokemuksen. Lisäksi stereoskooppisen videon esittämiseen CAVE-ympäristössä tarvittavia työkaluja tulisi kehittää, jotta videon esittämisestä voitaisiin tehdä vaivattomampaa ja toimivampaa.

Insinööriyössä tutkittiin, voitaisiinko CAVE-ympäristöä hyödyntää stereoskooppisen videon esitysalustana. Samalla saatiin myös tuntumaa siihen, minkälainen stereoskooppinen video ympäristössä esitettynä voisi toimia. Kuten kaikissa stereoskooppisissa videotuotannoissa, esitysnäytön koko ja katseluetäisyys on otettava kuvausvaiheessa huomioon, jotta stereovaikutelma olisi mahdollisimman toimiva.

CAVE-ympäristöön stereoskooppista videota tuottaessa olisi hyvä miettiä ainakin sitä, että kuvissa olisi paljon kohteita, joilla on negatiivinen parallaksi ja ne näyttäisivät työntyvän ulos näyttöpinnalta. Syvyysvaikutelma vahvistuu, kun kuviin lisää konvergenssia eli kuvista löytyy myös kohteita, joilla on positiivinen parallaksi. Tämä vahvistaa CAVE-käyttäjän virtuaalitodellisuuskokemusta. Jos tarkoituksena on simuloida käyttäjille todellisuutta mahdollisimman tarkasti, kannattaa interaktiivinen etäisyys pitää lähellä intraokulaarista etäisyyttä.

Videon resoluution tulisi olla mahdollisimman suuri, koska CAVE-ympäristössä katselu-etäisyys on lyhyt. Resoluutioon tietysti vaikuttavat julkaisu-ympäristön ja videosoitimen tekniset rajoitukset. Esimerkiksi DepthQ Playerissä yksittäisen videoraidan maksimiresoluutio on 1 920 x 1 080 pikseliä.

CAVE-ympäristön katselu-etäisyyden lyhyiden takia syvyysvaikutelma vahvistuu sitä enemmän, mitä kauempana kohteet videolla ovat. Tätä insinööritöitä varten kuvatussa videossa jotkin kohteet olivat CAVE-tilan katselu-etäisyyden kannalta kuvattu niin, että ne olivat hieman liian lähellä kameroita. Kohteiden sijoittelu videolle määräytyy siis pitkälti julkaisu-ympäristön ja katselu-etäisyyden mukaan. Hyvänä sääntönä voisi pitää sitä, että CAVE-ympäristöön videota tuottaessa kohteet kannattaa pitää etäämmällä, jotta kokemus olisi mahdollisimman toimiva. Lisäksi lattia-, ja CAVE-tilasta riippuen, kattonäyttöpintojen hyödyntämistä kokemuksen vahvistamiseksi tulisi tutkia. Lisäksi tulisi tutkia, miten ympäristön näyttöpintojen yhtymäkohtien aiheuttamien vääristymien ongelman voisi korjata.

CAVE-ympäristön projektitekniikka ja suljinlasit saatavat tummentaa näyttöpinnoilla esitettyä kuvaa, joten videon kirkkauteen kannattaa kiinnittää erityistä huomiota. Tulevaisuuden CAVE-ympäristöissä, joissa projektitekniikka on korvattu LCD-näyttöillä, kirkkausongelma poistuu ainakin osittain. Tässä insinööritöissä testaukseen käytetyssä CAVE-ympäristössä katsellun videon kirkkaus laski huomattavasti ja kirkkautta oli säädettävä jälkituotannossa paljon tavallista korkeammalle tasolle. Videon ja esitysympäristön välisten ristiriitojen havaitseminen ja korjaaminen tuotantovaiheessa on helpompaa, jos jatkuva testaaminen CAVE-ympäristössä kuvausten ja jälkituotannon lomassa on mahdollista.

CAVE-ympäristöissä esitellään paljon 3D-malleja, joiden sisällä käyttäjä voi itse liikkua ohjaimen avulla. Tähän insinööriyöhön tuotettu video oli kuvattu niin, että kamerat pysyivät paikallaan, koska kameroiden liian nopea liikuttelu olisi voinut rikkoa stereovaikutelmaa ja koska käytettävissä olleella kalustolla kameroiden liikuttaminen olisi ollut liian riskialtista. Hyvällä kalustolla ja esimerkiksi kiskojen avulla CAVE-ympäristöön voisi kuitenkin tuottaa stereoskooppista videota, joka loisi katsojalle vaikutelman, että hän itse olisi liikkeessä. Kameroiden liikuttamiseen liittyy kuitenkin paljon ongelmia, joten siihen tarvitaan osaamista ja erityiskalustoa. [2, s. 119.] Kameran liikuttelussa tulisi ottaa huomioon myös motion sickness -ongelma. Liikkuva kuva voisi kuitenkin luoda katsojille intensiivisemmän kokemuksen, joka korvaisi osaltaan sitä, että videota esittäessä CAVE-ympäristön paikannustekniikkaa ei voida hyödyntää.

6 Yhteenveto

Tähän asti CAVE-ympäristöjä on käytetty lähinnä tuotesuunnittelussa, arkkitehtuurissa ja lääketieteen aloilla ympäristönä, jossa on mahdollista tutkia esimerkiksi kolmiulotteisia prototyyppimalleja. CAVE-ympäristöjen käyttö esitysympäristönä myös muunlaiselle medialle laajentaisi niiden käyttömahdollisuuksia entisestään ja lisäisi mahdollisesti CAVE-järjestelmien kysyntää suunnittelumaailman ja lääketieteen ulkopuolella. Toisaalta järjestelmissä käytetty tekniikka on todella kallista, mikä osaltaan rajoittaa CAVE-ympäristöjen käyttöä laajemmin.

CAVE-ympäristön kehittäminen stereoskooppisen videon esitysalustana on uusi haaste tulevaisuuden kehittäjille. Samalla CAVE julkaisualustana luo uusia haasteita stereoskooppisen videon tuottajille. Stereoskooppisen videotuotannon kannalta on tärkeää, että uusia esittämisen tapoja ideoidaan ja kehitetään jatkuvasti. Uusissa CAVE2-ympäristöissä, joissa projektitekniikka on korvattu LCD-näytöillä, uudenlaisen median esittäminen saattaa olla nykyistä vaivattomampaa.

Koska tässä insinööriyössä testattiin videon julkaisua CAVE-ympäristössä ensimmäistä kertaa, julkaisualustan huomioonotto ilman tarkempaa ympäristön määrittelyä oli tuotantovaiheessa haastavaa. Tämän takia esimerkiksi katseluetäisyyden vaikutusta oli vaikeaa arvioida tarkasti. Uskon kuitenkin, että testauksissa ilmenneistä ristiriidoista kuvan ja alustan suhteen sekä niistä heränneistä ajatuksista on hyötyä tulevaisuuden tuotannoissa.

Mielestäni CAVE-ympäristön käyttäminen stereoskooppisen videon esitysympäristönä on käyttökelpoinen ajatus esimerkiksi museoihin videoinstallaatioteoksiin tai taide-esittelyihin. Näin voitaisiin syventää käyttäjien kokemuksia ja samalla tuoda niihin mukaan yhteisöllinen ulottuvuus. Toinen mahdollinen kohde, johon ideaa voisi soveltaa, on opetus. Kun lapset ja nuoret katselevat stereoskooppisesti tuotettua opetusvideota CAVE-ympäristössä, kokemus on intensiivisempi ja yhteisöllisempi ja mahdollisesti kannustaa lapsia ja nuoria oppimaan. Tietysti järjestelmiä voisi soveltaa opetukseen myös ylemmillä koulutusasteilla.

Lähteet

- 1 Developers' Handbook. Background on Creating Images for CrystalEyes and SimulEyes. 2009. Verkkodokumentti. StereoGraphics Corporation. <<http://www.cs.unc.edu/Research/stc/FAQs/Stereo/stereo-handbook.pdf>>. Luettu 18.2.2016.
- 2 Mendiburu, Bernard. 2009. 3D Movie Making. Stereoscopic Digital Cinema from Script to Screen. Burlington, MA: Focal Press.
- 3 Klein, Alexander. 1999. What is "Stereo" or 3D. Verkkodokumentti. Stereoscopia.com. <<http://www.stereoscopia.com/faq/whatis.html>>. Luettu 18.2.2016.
- 4 Dashwood, Tim. 2011. A Beginner's Guide to Shooting Stereoscopic 3D. Verkkodokumentti. Dashwood Cinema Solutions. <<http://www.dashwood3d.com/blog/beginners-guide-to-shooting-stereoscopic-3d/>>. Päivitetty 2011. Luettu 12.1.2016.
- 5 Depth Perception. Verkkodokumentti. The Ohio State University. <https://www.physics.ohio-state.edu/~kagan/AS1138/Lectures/19_depth.htm>. Luettu 19.2.2016.
- 6 Depth Perception. 2012. Verkkodokumentti. Science Learning. <<http://sciencelearn.org.nz/Contexts/Light-and-Sight/Science-Ideas-and-Concepts/Depth-perception>>. Luettu 19.2.2016.
- 7 Definition of Parallax. Verkkodokumentti. Oxford English Dictionary. <<http://www.oxforddictionaries.com/definition/english/parallax>>. Luettu 20.2.2016.
- 8 Stereoscopic Filmmaking Whitepaper. The Business and Technology of Stereoscopic Filmmaking. 2008. Verkkodokumentti. Autodesk, Inc. <http://download.autodesk.com/us/s3d/stereoscopic_whitepaper.pdf>. Luettu 23.2.2016.
- 9 Bourke, Paul. 1999. Calculating Stereo Pairs. Verkkodokumentti. paulbourke.net. <<http://paulbourke.net/stereographics/stereorender/>>. Luettu 23.2.2016.
- 10 How a 3-D movie is made – from Home to Hollywood 3-D. 2009. Verkkodokumentti. 3-D Revolution Productions. <<http://www.the3drevolution.com/3dscreen.html>>. Luettu 23.2.2016.
- 11 Voigt, Stefan D. 2010. Stereoscopic session 02 – Camera setup. Videodokumentti. YouTube. <<https://www.youtube.com/watch?v=KYicPx1mbw>>. Katsottu 19.1.2016.
- 12 Flock, Jason & Reeve, Simon. 2010. Basic Principles of Stereoscopic 3D. Verkkodokumentti. Sky UK Limited. <http://www.sky.com/shop/__PDF/3D/Basic_Principles_of_Stereoscopic_3D_v1.pdf>. Luettu 23.2.2016.
- 13 Bennett, Neil. How to Colour Grade Stereoscopic Footage. Verkkodokumentti. Digital Arts. <<http://www.digitalartsonline.co.uk/features/video-post-production/how-colour-grade-stereoscopic-3d-footage/>>. Luettu 23.2.2016.

- 14 Woligroski, Don. 2012. HP 2311 gt 23" Monitor Review: Passive, Polarized 3D On A Budget. 3D Display Technology: Passive Polarized vs. Active Shutter. Verkkodokumentti. Tom's Hardware.< <http://www.tomshardware.com/reviews/2311-gt-passive-3d-review,3242-2.html>>. Luettu 10.3.2016.
- 15 Demers, Cedrick. 2014. 3D TVs Active vs Passive. Verkkodokumentti. Rtings.<<http://www.rtings.com/tv/learn/3d-tvs-active-3d-vs-passive-3d>>. Luettu 10.3.2016.
- 16 Wilkinson, Scott. 2010. Dolby 3D. Verkkodokumentti. Sound & Vision.<<http://www.soundandvision.com/content/dolby-3d#iVwOut1QWkwcCZp5.97>>. Luettu 10.3.2016.
- 17 Rantanen, Kalevi. 2006. Kotiteatteri saa kolmannen ulottuvuuden. Verkkodokumentti. Tiede. <http://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/kotiteatteri_saa_kolmannen_ulottuvuuden>. Luettu 11.3.2016.
- 18 Rouse, Margaret. 2011. CAVE (Cave Automatic Virtual Environment). Verkkodokumentti. Whatis.com. <<http://whatis.techtarget.com/definition/CAVE-Cave-Automatic-Virtual-Environment>>. Luettu 19.1.2016.
- 19 Cave Vs HMD. 2016. Verkkodokumentti. Visbox, Inc. <<http://www.visbox.com/technology/cave-vs-hmd/>>. Luettu 15.3.2016.
- 20 CAVE Automatic Virtual Environment. 2016. Verkkodokumentti. Visbox, Inc. <<http://www.visbox.com/products/cave>>. Luettu 15.3.2016.
- 21 Enter the CAVE. 2012. Verkkodokumentti. Mechdyne Corporation. <<http://www.mechdyne.com/filesimages/Hardware/CAVE/Cave%20Diagram%202012.pdf>>. Luettu 16.3.2016.
- 22 New high-performance cave automatic virtual environment that functions with gesture recognition. 2013. Verkkodokumentti. Phys.org. <<http://phys.org/news/2013-04-high-performance-cave-automatic-virtual-environment.html>>. Luettu 16.3.2016.
- 23 Rouse, Margaret. 2011. CAVEman. Verkkodokumentti. Whatls.com. <<http://whatis.techtarget.com/definition/CAVEman>>. Luettu 15.3.2016.
- 24 Pape, Dave. 2001. The CAVE: A Virtual Reality System. Verkkodokumentti. Electronic Visualization Laboratory. <<https://www.evl.uic.edu/pape/CAVE/>>. Luettu 17.3.2016.
- 25 Virtuaalitekniikan laboratorio. Verkkodokumentti. Seinäjoen Ammattikorkeakoulu. <<http://www.seamk.fi/fi/Koulutus/Opiskelijana-SeAMKissa/Oppimisymposiumitja/Tekniikan-laboratoriot/Virtuaalitekniikan-laboratorio>>. Luettu 17.3.2016.
- 26 CAVE2 – An Advanced Cyberworld for Data Exploration. Verkkodokumentti. Electronic Visualisation Laboratory. <<https://www.evl.uic.edu/entry.php?id=1078>>. Luettu 7.4.2016.
- 27 Kuusisto, Jukka. Virtuaaliteknologian hyödyntäminen työkoneiden käyttäjälähtöisessä tuotekehityksessä. Verkkodokumentti. Agrotechnology From Finland. <http://agrotechnology.fi/sites/default/files/all_raportti.pdf>. Luettu 19.3.2016.

- 28 Rajlich, Paul John. 1998. The CAVE Environment. Verkkodokumentti. Visbox, Inc. <<http://www.visbox.com/prajlich/T/node7.html>>. Luettu 19.3.2016.
- 29 The Giva CAVE. 2015. Verkkodokumentti. University of Zurich. <<http://www.geo.uzh.ch/en/units/giva/services/cave-automatic-virtual-environment/>>. Luettu 21.3.2016.
- 30 Sigal, Leonid. 2012. (Marker-based) Motion Capture. Verkkodokumentti. Carnegie Mellon University. <<http://www.cs.cmu.edu/~yaser/Lecture-3-MarkerBased-Mocap.pdf>>. Luettu 21.3.2016.
- 31 Kenyon, Robert V. 1995. The CAVE Automatic Virtual Environment: Characteristics and Applications. Verkkodokumentti. <https://www.cs.uic.edu/~kenyon/Conferences/NASA/Workshop_Noor.html>. Luettu 21.3.2016.
- 32 Optical Tracking Explained. Verkkodokumentti. Ps-tech. <<http://www.ps-tech.com/3d-technology/optical-tracking>>. Luettu 21.3.2016.
- 33 CAVE. Verkkodokumentti. Visual Psychophysics and Perception Laboratory. <http://vision.opto.umontreal.ca/english/technologies/technologies_en.html>. Luettu 21.3.2016.
- 34 Hellman, Tapio. 2014. CAVE – Visualisointiluola. Verkkodokumentti. Seinäjoen ammattikorkeakoulu. <<http://www.seamk.fi/loader.aspx?id=e09cc783-6f1c-4a73-9e3f-00158502713f>>. Luettu 21.3.2016.
- 35 Laari, Jussi. 2016. Projekti-insinööri, Talotekniikka, Metropolia Ammattikorkeakoulu. Sähköpostikeskustelu 17.3.2016. Tiedot Satavision Oy.
- 36 Stereoscopic 3D Editing Workflow in Premiere Pro. 2015. Verkkodokumentti. Eincrou Productions Co.. YouTube. <<https://www.youtube.com/watch?v=2ffWZ3U5NTc>>. Katsottu 10.2.2016.
- 37 3D Tutorial - Create Stereoscopic 3D Videos for YouTube using Adobe Premiere. 2011. Verkkodokumentti. EnhancedDimensions. YouTube. <<https://www.youtube.com/watch?v=KbFhduJobss>>. Katsottu 20.1.2016.
- 38 Wimmer, Peter. 2016. Stereoscopic Player Features. Verkkodokumentti. 3dtv.at. <http://www.3dtv.at/Products/Player/Features_en.aspx>. Luettu 1.4.2016.
- 39 DepthQ Player for Stereoscopic Media. 2016. Verkkodokumentti. Lightspeed Design, Inc. <<http://www.depthq.com/player.html>>. Luettu 4.4.2016

